

CORNET
Final Report / Schlussbericht

ThermNat

Building components with insulation from sustainable raw materials: focus (hygro-) thermal conditions

Bauteile mit Dämmmaterial aus nachwachsenden Rohstoffen: Fokus (Hygro-)Thermik

Funded by / Gefördert durch CORNET

IGF-Project 271 EN supported by Forschungsvereinigung Trägerverein Institut für Holztechnologie Dresden e.V., AiF und BMWK on the basis of a decision by the German Bundestag

Project 877670 funded by Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

RTO / Forschungseinrichtungen

**Fraunhofer Institut für Bauphysik, Standort Holzkirchen, Valley, Germany (Fraunhofer-IBP)
Holzforschung Austria, Wien, Austria (HFA)**

Applicant / AiF-Forschungsvereinigung

Holztechnologie / Trägerverein Institut für Holztechnologie Dresden e.V., Dresden, Germany (TIHD)

Authors / Autoren/Autorinnen:

Dr. Daniel Zirkelbach, Johannes Tieben, Eri Tanaka, Dr. Notburga Pfabigan, Nis Andresen, Dr. Julia Bachinger, Dr. Bernd Nusser

with contributions by / unter Mitwirkung von:

B. Brunnhuber, L. Orlowski, Dr. R. Schwerd, M. Senoner BSc.

kindly supported by / unterstützt durch:

best wood SCHNEIDER GmbH, Daniel Kehl - büro für holzbauphysik, EGS-plan GmbH, Energie- und Umweltzentrum am Deister GmbH, GUTEX Holzfaserplattenwerk GmbH & CO. KG, Hanffaser Uckermark eG, Holzbau Deutschland Institut e.V., ISOCELL GmbH & Co KG, Isolena Naturfaservliese GmbH, LOPAS GmbH, Martin Epple - Bau.Tragwerk Ingenieurbüro, SonnenKlee GmbH, Soprema GmbH, STEICO SE, Sto GmbH, Tobias Tumfart GmbH, Verband Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen e.V.

Holzkirchen/Wien/Dresden, 30.06.2023

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
1.1	Übersicht	3
1.2	Hintergrund.....	4
1.2.1	Wärmeleitfähigkeit von DNR.....	4
1.2.2	Dauerhaftigkeit von DNR	5
2	Freilanduntersuchungen	7
2.1	Standort.....	7
2.2	Wandaufbau und Varianten	8
2.2.1	Grundvarianten (Nord- und Südfassade)	8
2.2.2	Spezialvarianten (Westfassade)	13
2.3	Messung und Sensoren.....	14
2.3.1	Außenklima	14
2.3.2	Bauteil und -innenklima	15
2.3.3	In-situ Wärmestrommessung	19
2.4	Zielsetzung der Freilanduntersuchungen	23
3	Dauerhaftigkeit von Naturfaserdämmstoffen	23
3.1	Laboruntersuchungen zur Dauerhaftigkeit	23
3.1.1	Beschreibung der Versuche.....	23
3.1.2	Ergebnisse	27
3.2	Ableitung von Grenzkurven und Entwicklung eines instationären Prognosemodells	32
3.2.1	Bisherige Untersuchungen zu minimalen Wachstumsvoraussetzungen.....	32
3.2.2	Festlegung der Grenzkurven für Naturfaserdämmstoffe	34
3.2.3	Holzabbau-Prognosemodell WUFI® HzP auf Basis des Biohygrothermisches Schimmel-Prognosemodells WUFI® Bio	35
3.2.4	Abgleich der Modelle mit den Versuchsergebnissen.....	38
3.3	Evaluierung anhand der Freilandversuchsaufzeichnungen	42
3.3.1	Klimatische Bedingungen im Bauteilgefach	42
3.3.2	Klimatische Bedingungen am Holzfaser-WDVS.....	46
3.4	Schlussfolgerungen und Ausblick	57
3.4.1	Laborversuche, Grenzwerte und Prognosemodell	57
3.4.2	Erkenntnisse aus den Freilandversuchen	59
3.4.3	Ausblick: Praxisvalidierung und weitere Differenzierung	60
4	Wärmeleitfähigkeit von Naturfaserdämmstoffen.....	61
4.1	Aktuelle Handhabung des Bemessungswerts	61
4.2	Ergebnisse der in-situ Wärmestrommessung.....	63
	Zusammenfassung in-situ Wärmestrommessungen	74
4.3	Labormessungen zur feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit (WLF)	76
4.3.1	Zielstellung und Voruntersuchungen mit hygrothermischer Simulation mit WUFI®	76
4.3.2	Messverfahren.....	80
4.3.3	Durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse	82
4.3.4	Zusammenfassung Labormessung.....	93
4.4	Nachberechnung der Laborversuche mit hygrothermischer Simulation und Bewertung	94
4.4.1	Durchführung der Simulation	94
4.4.2	Vergleich zwischen Simulation und Messung	95
4.4.3	Erkenntnisse aus den Nachberechnungen der Laborversuche	98
4.5	Überprüfung des Messverfahrens.....	98
4.5.1	Überprüfung anhand verschiedener Naturfaserdämmstoffe.....	99

4.5.2	Charakterisierung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit im hygrothermischen Materialdatensatz.....	103
4.5.3	Zusammenfassung Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit.....	104
4.6	Abgleich des Labordatensatzes mit Freilandaufzeichnungen	105
4.7	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	106
4.7.1	In-situ Wärmestrommessung und Nachsimulation.....	106
4.7.2	Weitere Ergebnisse aus der Auswertung der Freilandversuche	107
4.7.3	Laborverfahren zur Bestimmung der feuchteabhängigen WLF im Labor und Bewertung durch hygrothermische Simulation.....	108
4.7.4	Ausblick.....	109
5	Literatur.....	110
Anhang	114
	Entwicklung von Auswertungsmethode und Prognosemodellen bzgl. des Holzfäulerisikos	114

1 Einleitung

1.1 Übersicht

Im Kontext von Klimawandel und Begrenzung der CO₂-Emissionen kommt dem Bausektor über den Energiebedarf für Heizen und Kühlen sowie über die sog. graue Energie ein erheblicher Anteil zu. In der Gesellschaft ist ein zunehmendes Bewusstsein für die Problematik und auch eine zunehmende Bereitschaft zu erkennen, im eigenen Einflussbereich die erforderlichen Beiträge zu leisten. Baumaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen bieten dabei den erheblichen Vorteil, dass sie eine deutlich bessere CO₂-Bilanz als die meisten konventionellen Baustoffe aufweisen. Einem noch größeren Einsatz dieser Materialien stehen aktuell noch zwei Aspekte entgegen:

1. Baustoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sind i.d.R. feuchteempfindlich und können bei nicht geeignetem Einsatz geschädigt oder zerstört werden.
2. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (DNR) weisen im Vergleich zur konventionellen Konkurrenz oft erhöhte Wärmeleitfähigkeiten auf – zum Teil sehr wahrscheinlich auch durch ungerechtfertigt hohe Zuschläge für den Feuchtegehalt der Materialien.

Dass die Bewertung der Wärmeleitfähigkeit von DNR zu hoch liegt, lassen erste Erkenntnisse aus Forschungsprojekten der Holzforschung Austria und des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik vermuten [1, 2]. Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit gemäß den gängigen Normen scheint DNR dementsprechend zu benachteiligen. Im gegenständlichen Forschungsprojekt sollte daher das tatsächliche Dämmpotential von DNR ermittelt werden und vor allem die Einflussfaktoren Feuchtegehalt und Feuchteveränderungen im Detail untersucht werden. Ziel ist es, ein faires Ermittlungsverfahren der Wärmeleitfähigkeit für DNR zu entwickeln.

Das hygrothermische Verhalten von DNR kann bereits durch entsprechende Simulationsprogramme vorhergesagt werden. Momentan fehlen aber noch geeignete Bewertungsmodelle, die eine simulationsbasierte Vorhersage der Dauerhaftigkeit dieser Dämmstoffe (Resistenz gegen holzerstörende Pilze) anhand des prognostizierten Temperatur- und Feuchteverhaltens ermöglichen.

In Österreich wird in der neuen ÖNORM B 8110-2 [3] für einen Großteil der Bauteilaufbauten eine hygrothermische Simulation gefordert. Ohne ausreichende Grundlagen zur Bewertung von DNR werden diese häufig pauschal als ungeeignet eingestuft.

Für Vollholz wurden bereits Untersuchungen zur Fäulnisbeständigkeit durchgeführt und ein Isoplethenmodell zur Fäulnisprognose entwickelt ([4] auf Basis [5, 6]). Auf Grundlage dieses Modells entstand ein Beurteilungsmodell für hygrothermische Simulationsergebnisse [7].

Am Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) wurden im Rahmen des kürzlich abgeschlossenen Projekts »In2EuroBuild« [8] vergleichende Fäulnisbeständigkeitsuntersuchungen mit

Massivholz- und DNR-Proben von Innendämmmaterialien durchgeführt. Es zeigte sich eine vergleichbare bis höhere Beständigkeit der untersuchten DNR im Vergleich zu den Massivholzproben.

Im aktuellen Forschungsprojekt wurden darüberhinausgehende Untersuchungen zur Fäulnisbeständigkeit und Dauerhaftigkeit von DNR für verschiedene Einsatzbereiche durchgeführt, um eine geeignete Bewertung unterschiedlich beständiger DNR im Rahmen von Nachweisverfahren zu ermöglichen.

1.2 Hintergrund

1.2.1 Wärmeleitfähigkeit von DNR

Es ist weitgehend bekannt, dass Feuchte in Dämmstoffen deren Wärmeleitfähigkeit erhöht. Bei diffusionsdichten Dämmstoffen wie EPS ist ein erheblicher Wassergehalt von ca. 10 Vol.-% erforderlich, um die Wärmeleitfähigkeit um 0,01 W/(mK) bzw. bei einer Ausgangswärmeleitfähigkeit von 0,04 W/(mK) um 25 % zu erhöhen. Bei faserbasierten Stoffen kann eine viel geringere Wassermenge den Wärmefluss durch die Dämmschicht im Vergleich zum trockenen Zustand unter Temperaturerhöhung zumindest kurzfristig verdoppeln. Dieses Phänomen wird als Latentwärmeeffekt bezeichnet und entsteht dadurch, dass Feuchte auf der warmen Seite verdunstet und durch Dampfdiffusion auf die kalte Seite transportiert wird, wo sie wieder kondensieren kann. Dabei wird auf der Warmseite Wärme durch Verdunstungskühlung entzogen und auf der Kaltseite als Kondensationswärme wieder zugeführt, was den Wärmestrom durch das Dämmmaterial entsprechend erhöht. Anders als beispielsweise Mineralwolle oder EPS können Naturfaserdämmungen Feuchte an den Innenflächen ihrer Porenstrukturen speichern. Das bedeutet, dass Naturfaser-Dämmungen normalerweise nie trocken sind, sondern je nach Umgebungsluftfeuchte eine sogenannte Gleichgewichtsfeuchte aufweisen. Daher erhalten diese Materialien normalerweise höhere feuchtebedingte Zuschläge auf die Wärmeleitfähigkeit, um sowohl der erhöhten Wärmeleitfähigkeit als auch dem latenten Wärmetransport Rechnung zu tragen [9, 10]. Aber anders als bei der Messung von normaltrockener Mineralwolle oder EPS wird bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit von Naturfasermaterialien automatisch bereits ein bestimmter Feuchtegehalt berücksichtigt (Ausgleichsfeuchte bei Umgebungsklima). Der latente Wärmetransport in gedämmten Bauteilen ergibt sich jedoch nicht nur durch Sorptionsfeuchte im Dämmstoff selbst, sondern auch durch Umverteilung von Feuchte aus den angrenzenden Materialien. Dieses verdunstet ebenfalls auf der Warmseite und wandert durch die dampfdurchlässige Dämmschicht bis zur kalten Seite, wo sie wieder kondensiert [2]. Dieser Effekt ist theoretisch besonders ausgeprägt bei nicht hygroskopischen Dämmstoffen wie Mineralwolle, da der Wasserdampf in kurzer Zeit von der warmen zur kalten Seite wandert, ohne auf diesem Weg von den Fasern de- und absorbiert zu werden. Die Hygroskopizität von Naturfasern [11] bewirkt eine Verlangsamung dieses Prozesses, da sie einen Teil des

eindringenden Dampfes aufnehmen. Dadurch wird der Latentwärmehtransport im Vergleich zu einer Mineralwolle-Dämmschicht ggf. reduziert. Dieser Effekt wird im Labor nur teilweise (Feuchte im Dämmstoff selbst) erfasst, da die Dämmstoffe als Einzellagen ohne benachbarte Materiallagen geprüft werden. Es ist dementsprechend davon auszugehen, dass diese Testbedingung die Naturfaserdämmungen benachteiligt.

Im Rahmen des aktuellen Forschungsprojektes soll deshalb ein Laborverfahren für hygroskopische Dämmstoffe entwickelt werden, das sowohl eine bessere Differenzierung zwischen Wärmeleitfähigkeits- und Latentwärmeanteil am gemessenen Wärmestrom ermöglicht als auch das energetische Verhalten der Materialien realistisch abbildet. Auf dieser Basis soll dann der bisher angesetzte Feuchtezuschlag lt. [9] und [10] kritisch evaluiert werden.

1.2.2 Dauerhaftigkeit von DNR

Holz- und Naturfaserdämmungen sind biologische Materialien, die bei „günstigen“ Temperatur- und Feuchtebedingungen einem natürlichen Abbau unterliegen. Daher ist es wichtig, solche Materialien nur hygrothermischen Bedingungen auszusetzen, die ein Keimen und Wachsen von Fäulnispilzen verhindern. Ein allgemeiner, aber eher vorsichtiger und konservativer Grenzwert für die Massivholzfeuchte ist der Grenzwert von 20 Masse-% [12]. Dieser Grenzwert enthält allerdings eine hohe Sicherheit, da Fäulnis erst bei Feuchtegehalten oberhalb der Fasersättigung von etwa 27 bis 30 M.-% auftritt. Außerdem laufen biologische Prozesse wie der Abbau nur dann mit einer relevanten Geschwindigkeit ab, wenn auch die Temperaturen auf einem für das Pilzwachstum günstigen Niveau liegen. Die WTA-Richtlinie 6-8 [7] zur Bewertung von Holzkonstruktionen hat daher ein neues Kriterium für Massivholz aufgestellt, das nicht vom Wassergehalt in M.-% abhängt, sondern von der relativen Luftfeuchte in den Poren des Baustoffs (Abbildung 1). Die relative Porenluftfeuchte im Holz ist ein geeignetes Maß dafür, wie „leicht“ die Feuchte für die Pilze im Material verfügbar bzw. entnehmbar ist. Diese, immer noch vorsichtige Grenzwertkurve steigt temperaturabhängig von 86 % rel. Luftfeuchte bei 30 °C bis auf 95 % r.F. bei 0 °C und basiert hauptsächlich auf den Untersuchungen von Viitanen [5, 6] und Kehl [4].

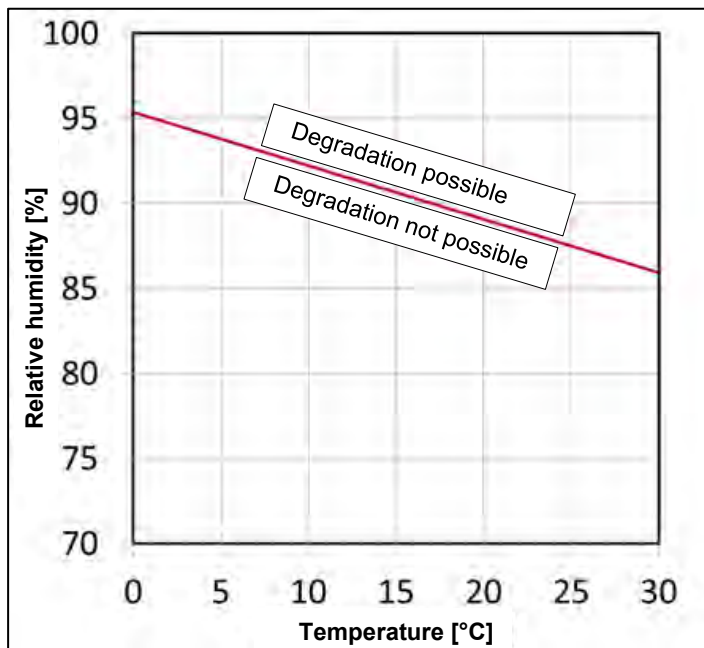


Abbildung 1: Grenzkurve der rel. Porenluftfeuchte bezogen auf die Temperatur einer 10 mm dicken Holzschicht, die im Tagesmittel nicht überschritten werden darf. Übersetzt aus dem Deutschen [7].

Aber auch diese Grenzwerte sind stationär und können daher bei kurzfristigen Feuchtespitzen, die die Grenzwerte überschreiten, bereits zum formalen Versagen eines Bauteils führen. In der Praxis führen diese kurzzeitigen Überschreitungen normalerweise jedoch nicht zu Problemen, wenn die Feuchte anschließend schnell genug wieder austrocknen kann. Aus diesem Grund entwickelt das Fraunhofer-IBP derzeit ein instationäres Holzfäulemodell, das die Lücke zwischen den temperaturabhängigen Langzeitgrenzwerten aus WTA und dem realen Verhalten soweit wie möglich schließen soll [13].

Bei Holzwerkstoffen beziehen sich die gültigen Grenzwerte oft nicht auf den Zerfallsbeginn, sondern auf die Festigkeitseigenschaften der Werkstoffe. Statisch relevante Holzwerkstoffe dürfen in der Regel einen Feuchtegehalt von 18 M.-% nicht überschreiten [12, 14] um sicherzustellen, dass die Festigkeitseigenschaften auch wirklich der Deklaration entsprechen.

Für nicht tragende Naturfaserdämmungen gibt es bisher kaum belastbare Grenzwerte. Die 18 M.-% gelten in diesem Fall eigentlich nicht, werden aber in der Praxis mangels Alternativen doch immer wieder herangezogen. Da einige Fasermaterialien weniger feuchtebeständig sein könnten als Massivholz, sind auch die WTA-Grenzwerte [7] nicht angemessen. Das stellt Hersteller und Planer vor Probleme, wenn die Materialien in Anwendungsbereichen eingesetzt werden sollen, in denen höhere Feuchtegehalte auftreten können. Dazu gehört beispielsweise der Einsatz in Flachdächern und Wärmedämmverbundsystemen (WDVS), aber auch die Anwendung in der Nähe der Außenseite von Bauteilen, wo insbesondere in der Nacht oder in den Wintermonaten eine hohe rel. Luftfeuchte auftreten kann. Auf der anderen Seite gibt es auch Faserdämmungen, die widerstandsfähiger sind als Massivholz [15, 8]: Sie sind oftmals

durch Hydrophobierungsmittel, die die Faseroberflächen quasi ummanteln, vom Zugriff durch die Pilze geschützt. In anderen Fällen enthalten die Materialien vor allem aus Brandschutzgründen auch Salze oder andere Stoffe, die im Nebeneffekt den Verrottungsprozess verhindern (z.B. Zellulosefaser).

Im aktuellen Forschungsprojekt stand deshalb unter anderem die Entwicklung eines instationären Bewertungsmodells für Faserdämmstoffe im Fokus, welches die abweichenden Spezifikationen dieser Werkstoffe im Vergleich zu Massivholz berücksichtigt und eine belastbare Bewertungsgrundlage für Hersteller und Planer bieten soll.

2 Freilanduntersuchungen

Das Rückgrat der im Rahmen des Projekts durchgeführten Untersuchungen bildete ein im Realmaßstab angelegter Freilandversuch. Dieser wurde am Forschungshaus der Holzforschung Austria in Stetten (AT) durchgeführt. Der Kern des Versuchs war es, die realen Klimabedingungen (Temperatur, Luftfeuchte) in verschiedenen ausgeführten Versuchsaußenwänden für mindestens ein Jahr unter realen, instationären Klimarandbedingungen aufzuzeichnen. Außerdem wurden verschiedene in-situ Wärmestrommessungen durchgeführt. Diese Aufzeichnungen sollten später zum simulationsbasierten Abgleich der Ergebnisse aus den Labormessungen zur Wärmeleitfähigkeit sowie zur Evaluierung der ermittelten Grenzwerte der Dauerhaftigkeitsuntersuchungen herangezogen werden.

2.1 Standort

Das Forschungshaus der Holzforschung Austria (Abbildung 2) befindet sich direkt am HFA-Standort, Gewerbegebiet 6, AT-2100 Stetten (48°21'57.6"N 16°21'33.0"E, 169 m ü. Adria).

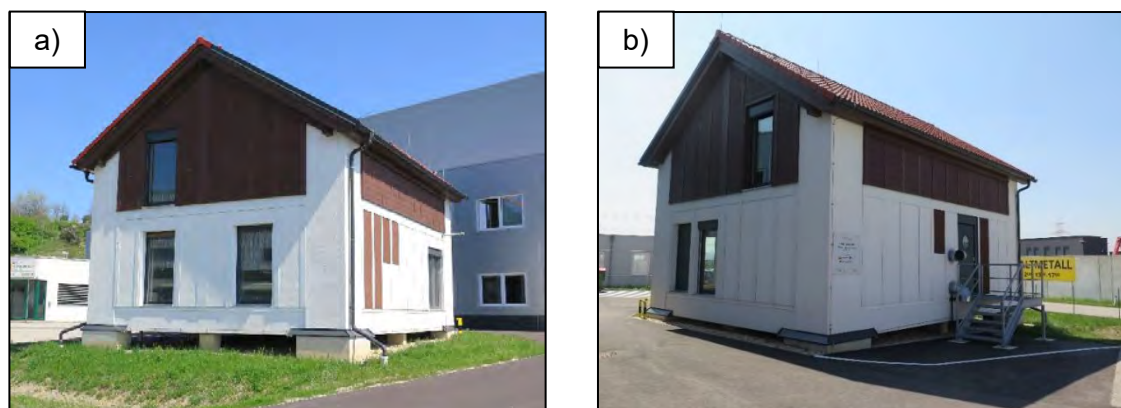


Abbildung 2: Forschungshaus der Holzforschung Austria in AT-2100 Stetten. a) Süd-West Ansicht. b) Nord-Ost Ansicht.

Die Außentemperatur liegt hier im Jahresmittel bei ca. 10,8 °C und die durchschnittliche relative Luftfeuchte bei 70 % bis 75 % bei überwiegenden Nordwest- und Südostwinden. Das Gelände ist eher flach, weshalb häufig Windgeschwindigkeiten bis 16 m/s auftreten können. Die Globalstrahlung (direkt + diffus) liegt im Jahresdurchschnitt bei 136,5 W/m² mit einem durchschnittlichen täglichen Maximum von 350 W/m² im Juni und 63 W/m² im Dezember [16]. Die Außenwände sind exakt in Nord-, Ost-, Süd- und Westrichtung ausgerichtet. Auf der Ostseite befindet sich in unmittelbarer Nähe des Forschungshauses die Halle des Akustik Center Austria (ACA). In alle anderen Himmelsrichtungen sind die Fassaden des Hauses nahezu freistehend (Abbildung 3).

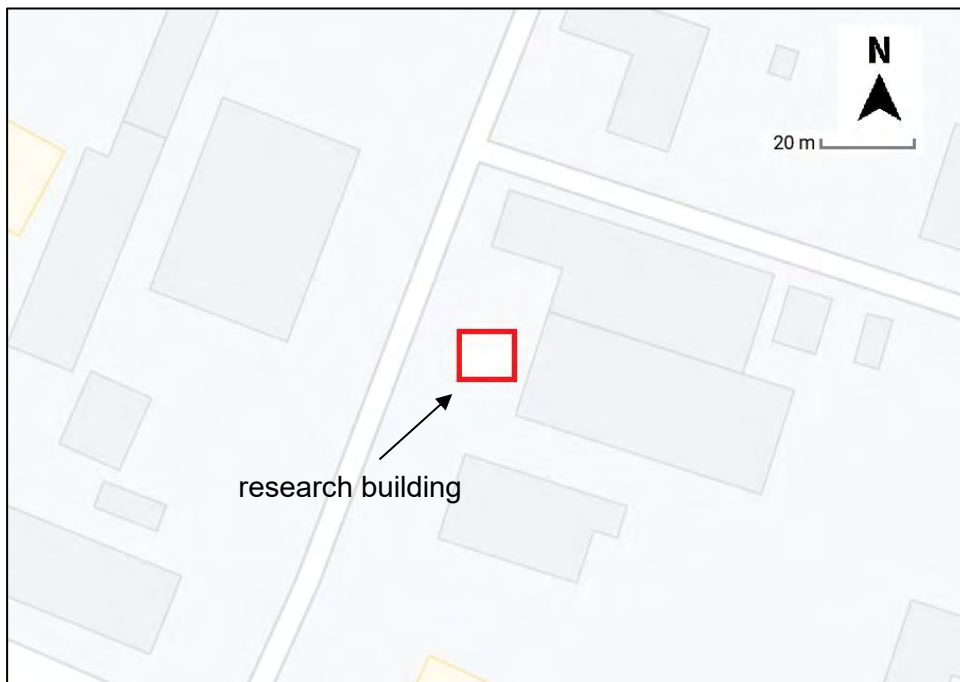


Abbildung 3: Lage und Umgebung des Forschungshauses (Quelle: maps.google.com).

2.2 Wandaufbau und Varianten

2.2.1 Grundvarianten (Nord- und Südfassade)

Für den Freilandversuch wurden an den Hauptfassaden (N und S) des Forschungshauses verschiedene Wandelemente verbaut und mit Sensorik versehen. Alle Wandaufbauten wurden in Holzrahmenbauweise mit variierenden Gefachdämmungen, Fassadensystemen und Putzoberflächenfarben ausgeführt. Abbildung 4 zeigt eine grobe Übersicht der Süd- und Nordwand des Forschungshauses samt Positionsnummerierung, Gefachdämmung und Fassadenausführung der Varianten. Als Gefachdämmungen kamen insgesamt 5 Materialien mit einigen Produktvarianten zum Einsatz:

- Glasfaser (keine Produktvariation)
- Holzfaser (Holzfaservlies, Holzfasereinblasdämmung)

- Zellulose (keine Produktvariation)
- Schafwolle ($\lambda_{10tr}= 0,039$ W/mK, $\lambda_{10tr}= 0,04$ W/mK)
- Stroh (keine Produktvariation)

Die Fassade wurde in drei verschiedenen Varianten ausgeführt:

- Putzfassade mit EPS-WDVS (HBW=79, HBW =17)
- Putzfassade mit Holzfaser-WDVS (HBW=79, HBW =17)
- Hinterlüftete Lärchenholzfassade

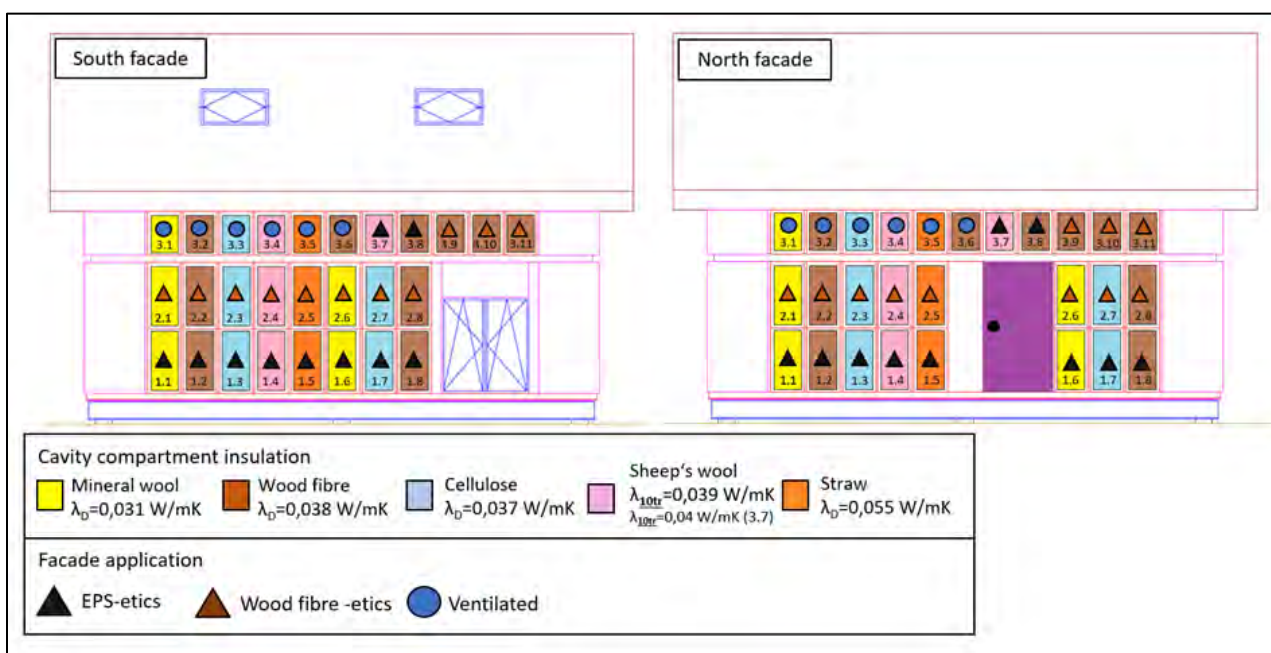


Abbildung 4: Fassadenansichten Süd- und Nord mit Elementnummern sowie Gefachdämmungs- und Fassadenausführungen.

Bei den Holzfaser-WDVS Elementen wurde zusätzlich eine Variation der Dichte und des Herstellungsverfahrens berücksichtigt:

- Trockenverfahren, $\rho = 140$ kg/m³, $\lambda_D = 0,04$ W/mK, $d = 100$ mm
- Trockenverfahren, $\rho = 110$ kg/m³, $\lambda_D = 0,037$ W/mK, $d = 100$ mm
- Trockenverfahren, $\rho = 180$ kg/m³, $\lambda_D = 0,043$ W/mK, $d = 100$ mm
- Nassverfahren, $\rho = 265$ kg/m³, $\lambda_D = 0,048$ W/mK, $d = 60$ mm

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen eine Aufnahme der beiden fertigen Fassaden nach dem Einbau der verschiedenen Wandelemente mit den verschiedenen Oberflächenfarben und Fassadensystemen.



Abbildung 5:Foto Südfassade.



Abbildung 6: Foto Nordfassade.

In Abbildung 7 und Abbildung 8 sind sämtliche Varianten im Schichtaufbau mit den relevanten Variablen (Gefachdämmung, Außenbeplankung, Fassadensystem und Oberflächenfarbe) im Detail dargestellt.

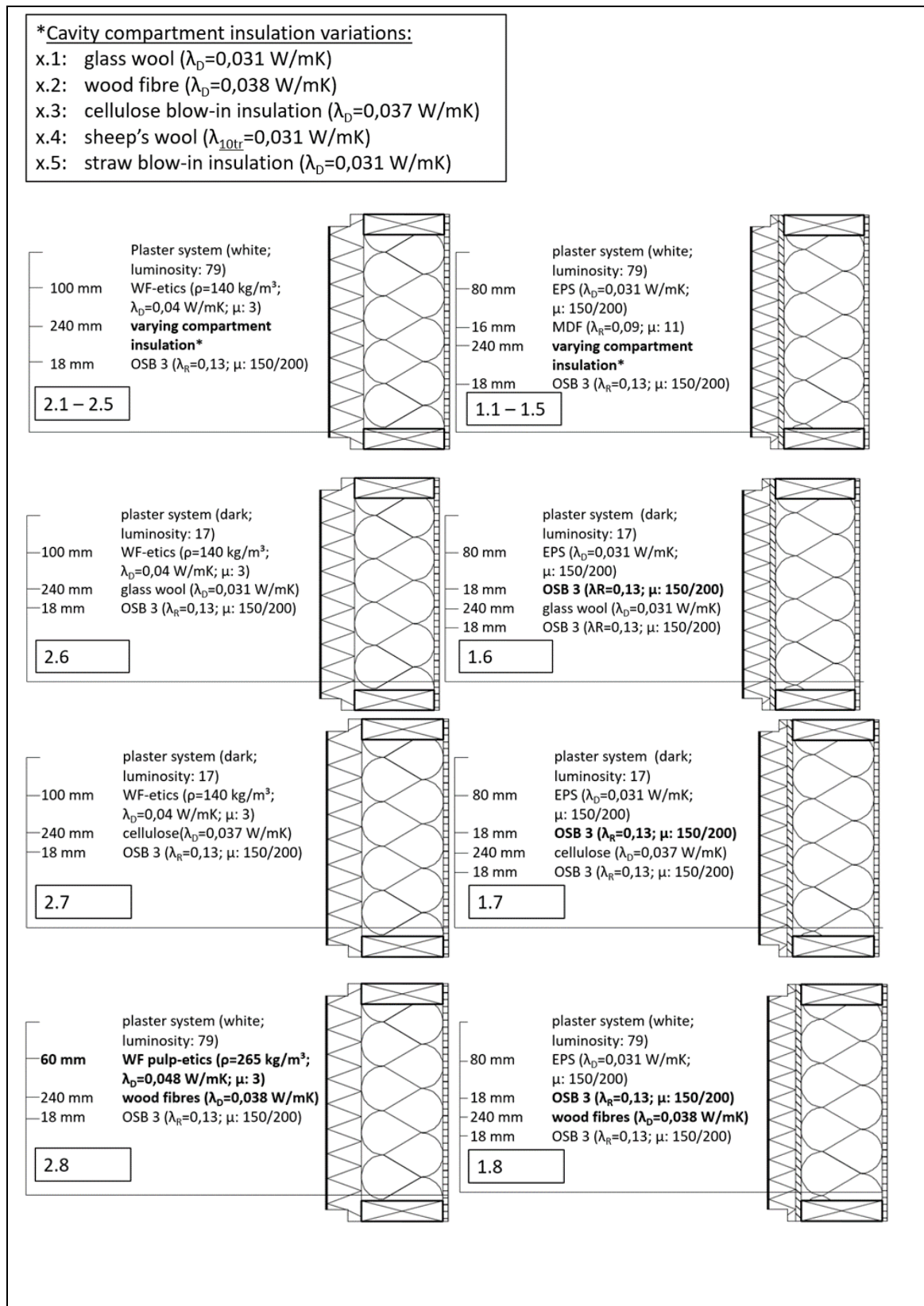


Abbildung 7: Schichtaufbau und Elementnummern der Wandelemente im Freilandversuch (Reihe 1 und 2).

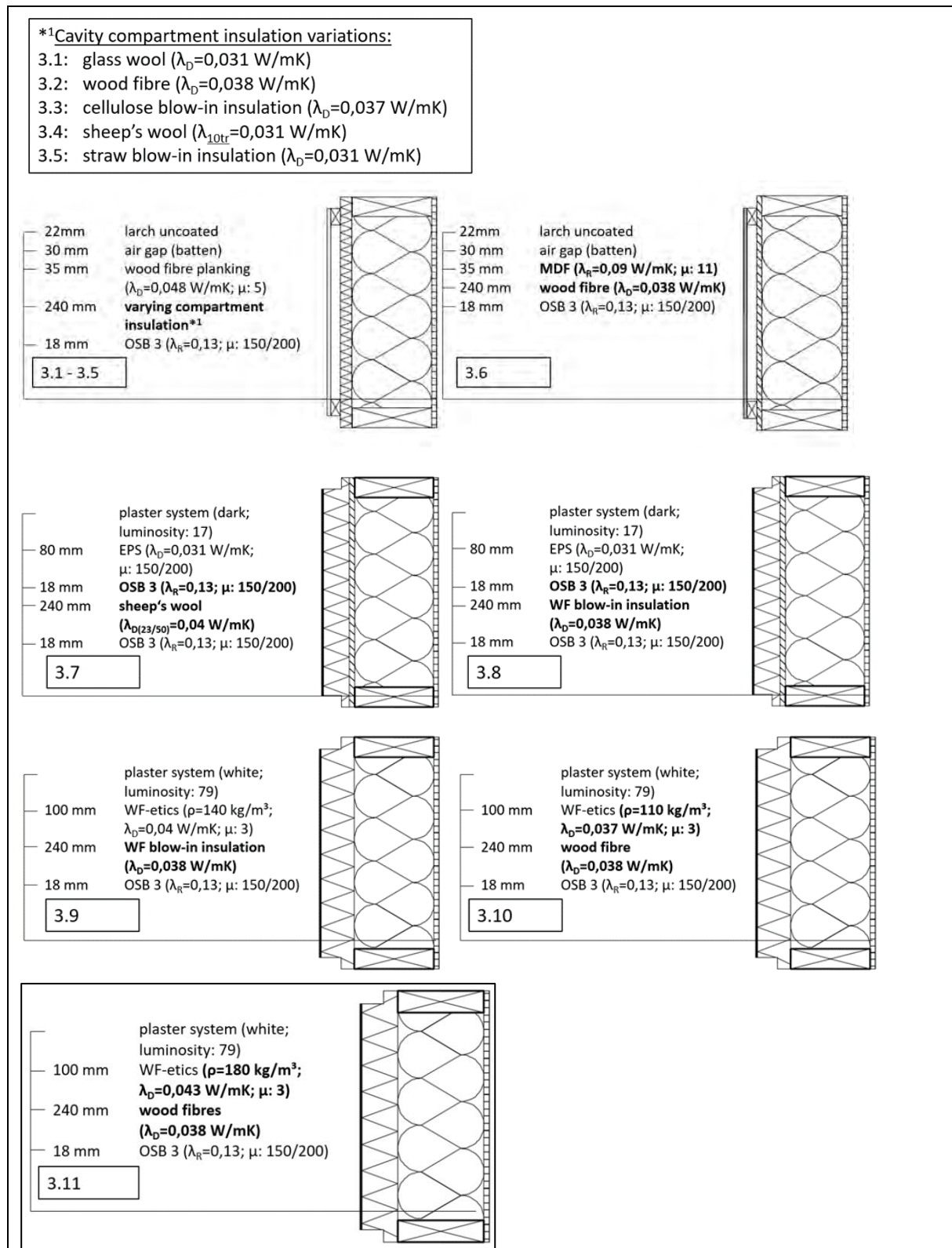


Abbildung 8: Schichtaufbau und Elementnummern der Grundvarianten im Freilandversuch (Reihe 3).

Um den thermischen und hygrischen Einfluss der benachbarten Elemente untereinander auf ein vernachlässigbar geringes Minimum zu reduzieren, wurden die Elementstöße rundherum

mit einer entsprechenden hygrischen und thermischen Trennung ausgeführt (Abbildung 9). Zur thermischen Trennung wurde ein 50 mm starkes, umlaufendes Dämmstoffvlies eingesetzt. Die hygrische Trennung wurde durch ein geeignetes, dampfdichtes Klebeband sichergestellt.

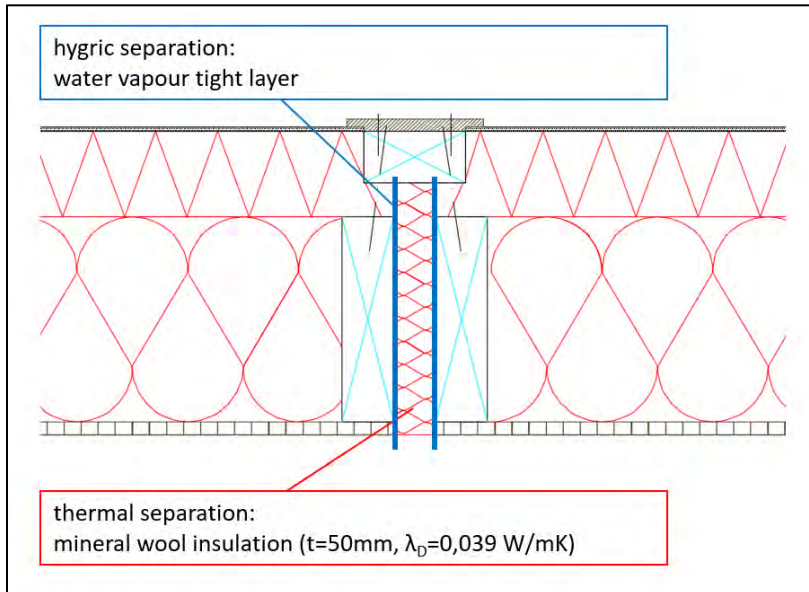


Abbildung 9: Ausführung der Elementstöße mit thermischer und hygrischer Trennung.

2.2.2 Spezialvarianten (Westfassade)

In Ergänzung zu den Grundvarianten wurden insgesamt vier spezielle Zusatzvarianten definiert, die auf der Westseite des Forschungshauses untergebracht wurden (Abbildung 10 und Abbildung 11).

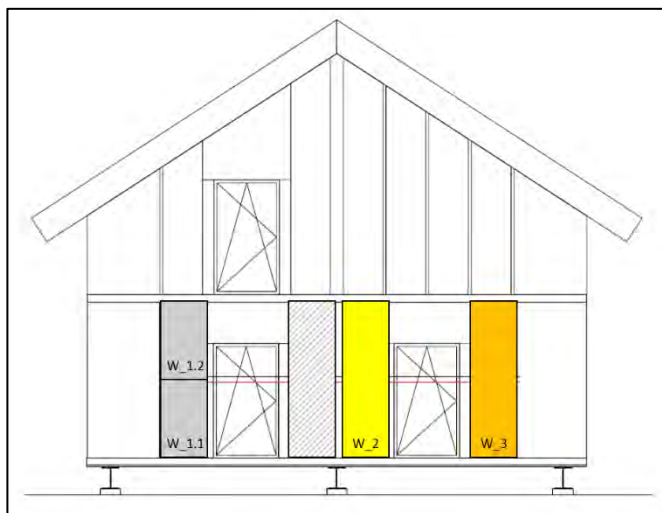


Abbildung 10: Elementpositionen auf der Westseite



Abbildung 11: Foto Westfassade

Der jeweilige Schichtaufbau der Spezialvarianten geht aus Abbildung 12 hervor. Bei den Varianten W_1.1 und W_1.2 handelt es sich um Mauerwerkselemente mit Holzfaser-WDVS

Fassade. Bei der Variante W_2 handelt es sich um einen speziellen Sanierungsaufbau mit luftdicht folierter Gipsfaser-Außenbeplankung. Beim Aufbau W_3 handelt es sich um einen nicht konventionellen Aufbau auf Naturstoffbasis, bei dem die 280 mm Strohhäcksel-Dämmung mit einem Einpressverfahren eingebracht wurde. Durch dieses Verfahren wird sichergestellt, dass die einzelnen Strohhäckselstücke vorzugsweise parallel zur Wandebene verbleiben. Diese Ausrichtung lässt eine Minimierung der Wärmeleitfähigkeit normal zur Wandebene erwarten.

Die thermische und hygri sche Trennung der Wandelementstöße wurde analog zu den Grundvarianten auch auf der Westfassade entsprechend Abbildung 9 ausgeführt.

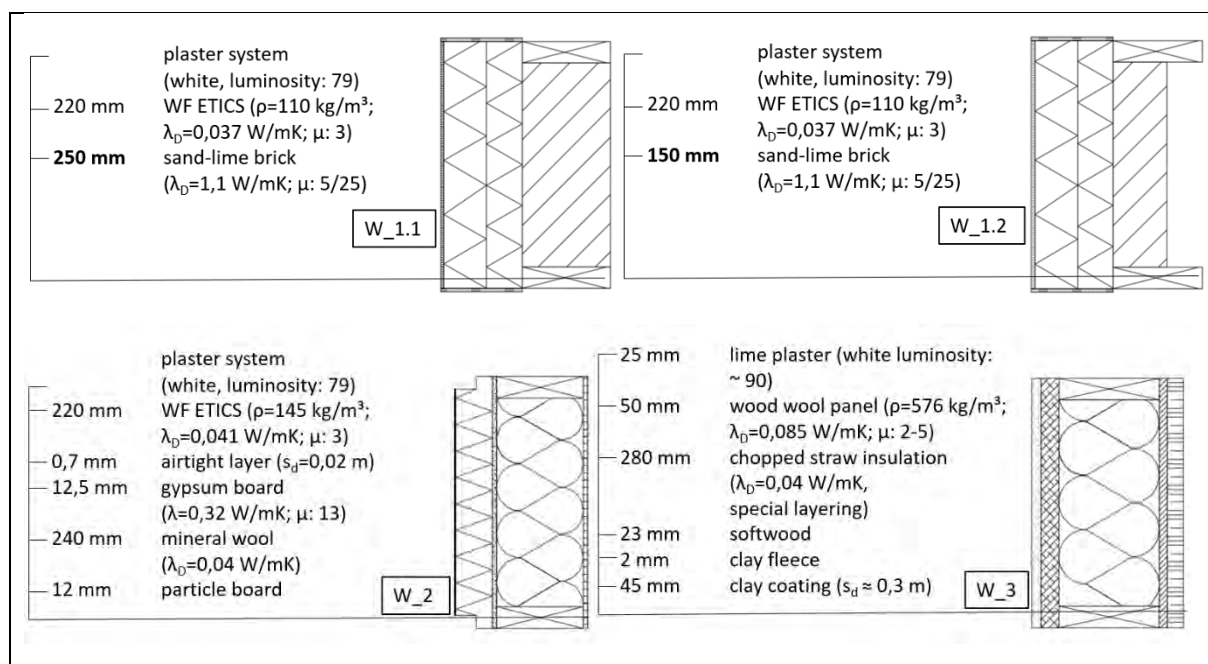


Abbildung 12: Schichtaufbau und Elementnummern der Spezialvarianten im Freilandversuch (Westfassade).

2.3 Messung und Sensoren

2.3.1 Außenklima

Die Aufzeichnung des Außenklimas am Standort des Forschungshauses in Stetten erfolgte mittels Ahlborn FHAD 46-C4AG Fühler (Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck), FMA-510 Meteo Multigeber (Windrichtung, -geschwindigkeit) und Ahlborn FLA 613 GS Sensor (Globalstrahlung) (Abbildung 13). Diese Messinstrumente waren auf dem freistehenden Flachdach des Akustik Center Austria (ACA) am Standort des Forschungshauses angebracht (Abbildung 14). Die gemessenen Umgebungsklimadaten wurden mittels Datenlogger (Ahlborn ALMEMO 2890) in 10-minütigen Abständen aufgezeichnet. Die Umgebungsklimaaufzeichnung fand zwischen dem 16.12.2021 und dem 31.01.2022 statt.



Abbildung 13: Einzelne Komponenten der Wetterstation



Abbildung 14: Wetterstation am Dach des ACA in Stetten

2.3.2 Bauteil und -innenklima

Zur Aufzeichnung des Klimas im Wandaufbau kamen verschiedenartige Sensoren zum Einsatz. Eine Übersicht zum Teil aufbauspezifische Sensorpositionen und -arten ist in Abbildung 15 dargestellt. Die Bauteiltemperaturen wurden je nach Aufbau jeweils zentriert an zwei bis drei relevanten Positionen im Bauteil gemessen. Die Messung erfolgte mittels NTC-Fühler und Thermoelementen (NiCr). Bei allen Grundvarianten in Rahmenbauweise, sowie bei der Spezialvariante W_3 wurde die Temperatur an der Außenseite der Innenbeplankung gemessen (Position: „i“; Sensor: NTC). Außenseitig wurde in allen Gefachen die Temperatur- und Luftfeuchte aufgezeichnet (Position: „a“; Sensor: NTC/kapazitiv). Bei allen Elementen mit WDVS wurde zwischen Putz- und Dämmstoffschicht die Temperatur aufgezeichnet (Position „P“; Sensor: NiCr). Bei den Aufbauten mit Holzfaser-WDVS wurde an dieser Position zusätzlich die Luftfeuchte aufgezeichnet (Sensor: Balsa – siehe Kapitel 2.3.2.2).

Parallel zu den Klimaaufzeichnungen im Bauteil und im Außenbereich wurde das Innenklima im Untergeschoss und Obergeschoss des Forschungshauses aufgezeichnet. In beiden Stockwerken kam ein Kombifühler in ca. 1,50 m Höhe (Fußbodenabstand) zum Einsatz. Diese zeichneten jeweils die Temperatur (NTC) und die Luftfeuchte (kapazitiv) auf. In Ergänzung wurde in beiden Stockwerken außerdem jeweils nord- und südseitig die oberflächennahe Temperatur in 10 cm Abstand zur Wandoberfläche aufgezeichnet.

Die winterliche Solltemperatur im Innenraum des Forschungsgebäudes lag bei 22 °C. In den Sommermonaten wurde der Innenraum nicht aktiv gekühlt. Die Außenverschattung war zu dieser Zeit durchgehend aktiv, um den Innenraum vor zu hohen solaren Strahlungseinträgen

zu schützen. Bis zum 19.10.2021 gab es keine inneren Lasten. Ab diesem Tag wurde die Luftfeuchte im Innenraum auf 60 % bis 65 % r.F. geregelt, um in der zweiten Kälteperiode eine hohe Feuchtelast anzusetzen.

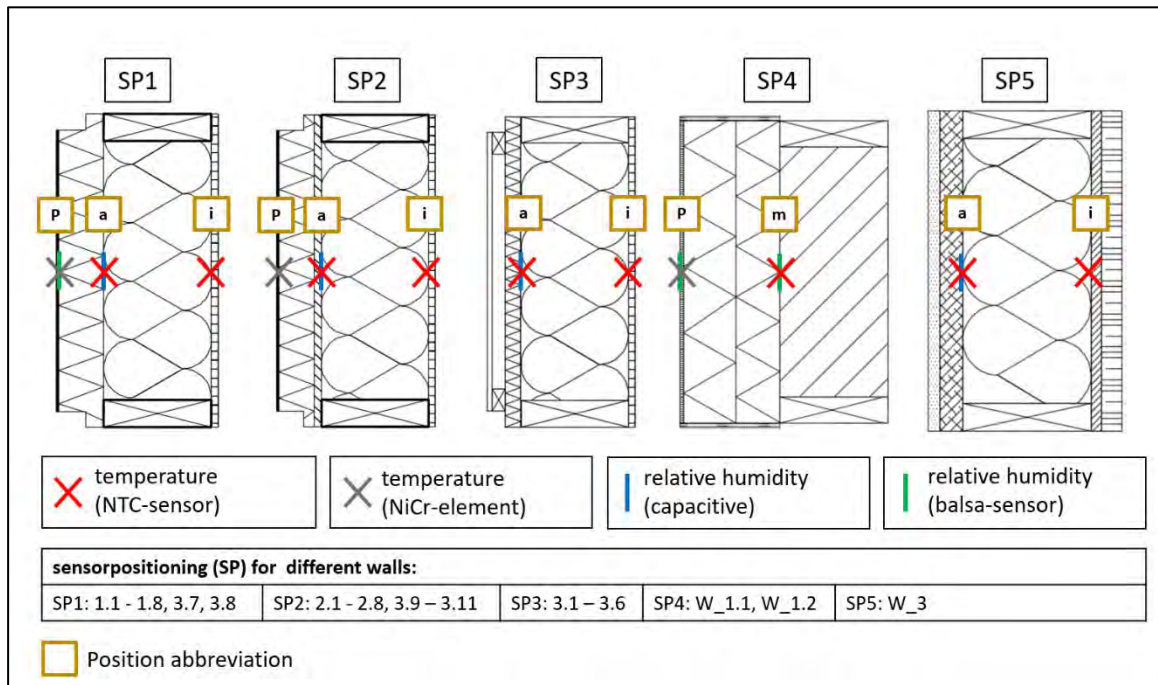


Abbildung 15: Übersicht zu den Sensorpositionen und -arten im Bauteilquerschnitt. Angaben zu entsprechenden Wandelementnummern und Positionskürzeln.

2.3.2.1 Simulationsbasierte Messwertkorrektur

Im Laufe der Aufzeichnung wurde anhand eines simulationsbasierten Temperaturabgleiches an der Messposition „a“ erkannt, dass die frontale Einführung des Sensors (Abbildung 16) aufgrund eines Wärmebrückeneffekts bei großen Temperaturdifferenzen zwischen Außen- und Innenbereich zu einer erhöhten Temperatur unmittelbar an dieser Position führt (Abbildung 17). Bei einer Oberflächentemperaturdifferenz von ca. 29 K zwischen Innen- und Außenoberfläche im März 2021 wichen die simulierte und die gemessene Temperatur um bis zu 4 K voneinander ab. Wobei die gemessene Temperatur den höheren Wert zeigte.

Der Effekt dieser Wärmebrücke wurde unterschätzt, da der zu erwartende Einfluss auf die gesamte Bauteilfläche gesehen vernachlässigbar gering ist. Da in diesem Fall direkt an jener Position gemessen wurde, an der der thermische Effekt maximal ist, und der Sensorkopf selbst fest mit der Brücke verbunden ist (keine Übergangswiderstände), führte dies zu den oben beschriebenen Abweichungen.

Die Simulationsmodelle der Hauptvarianten auf der Nord- und Südseite zeigten sehr gute Übereinstimmungen mit den durchgeführten Wärmestrommessungen (siehe Kapitel 4.3). Anhand der Simulationsmodelle der Varianten 1.1 und 2.1 wurde der Temperaturverlauf an der Messposition „a“ mithilfe der aufgezeichneten Oberflächentemperaturen simulationsbasiert korrigiert. Diese Varianten wurden gewählt, da sie die beste

Übereinstimmung zwischen Wärmestrommessung und Simulation zeigten. Außerdem weisen sie den niedrigsten U-Wert der Vergleichsvarianten auf. An der Position „a“ sind deshalb bei diesen Varianten die niedrigsten Temperaturen zu erwarten. Bei der Anpassung der relativen Luftfeuchte auf Basis dieser Korrekturtemperaturen lag man dadurch bei jeder Hauptvariante (1.1 – 1.5 und 2.1 – 2.5) auf der sicheren Seite. Die Korrektur der relativen Luftfeuchte wurde variantenspezifisch durchgeführt. Dazu wurde jeweils der gemessene Verlauf des Wasserdampfpartialdrucks auf den korrigierten Temperaturverlauf bezogen. Bei den Varianten mit deutlich höheren U-Werten kommt es dadurch ggf. zu einer leichten Überschätzung der relativen Luftfeuchte.

Für die hinterlüfteten Varianten, sowie für die Varianten W_2 und W_3 konnte keine simulationsbasierte Messwertkorrektur durchgeführt werden. Bei der Auswertung der Klimabedingungen wurden diese Varianten deshalb ausgelassen.



Abbildung 16: Frontaler Einbau der Kombifühler (Messposition „a“).

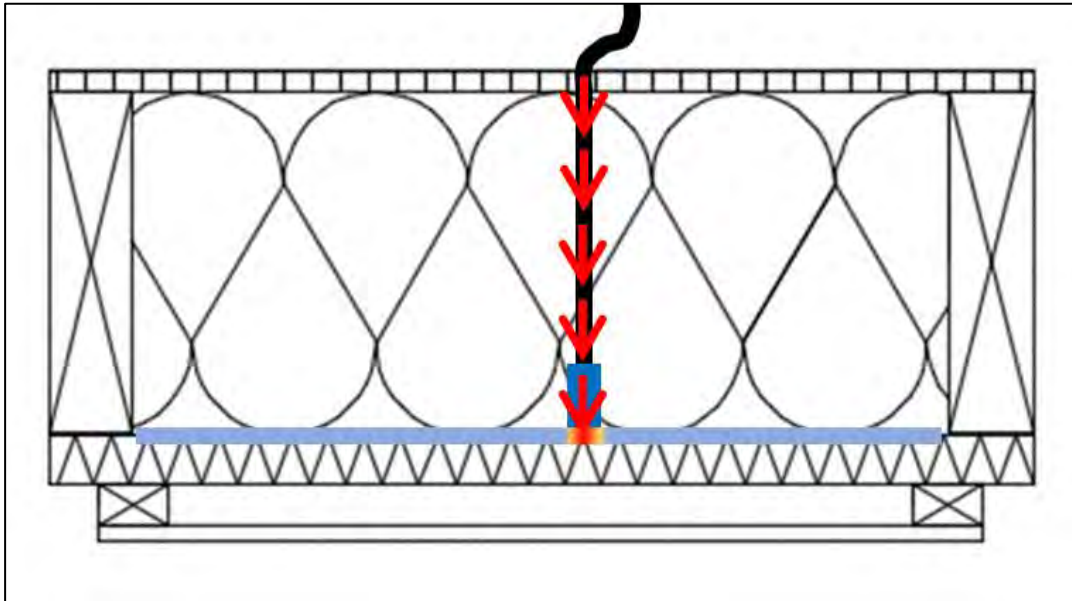


Abbildung 17: Schematische Skizze des durch frontalen Einbau ausgelösten Wärmebrückeneffekts.

2.3.2.2 Luftfeuchteaufzeichnung mittels Balsa-Holz Fühler

Die Luftfeuchte in den Poren zwischen Putz und WDVS-Dämmschicht (Position: „P“) wurde mit speziell angefertigten Balsa-Sensoren (Abbildung 18) in Kombination mit einer Temperaturmessung (NiCr) aufgezeichnet. Prinzipiell handelte es sich dabei um eine Widerstandsmessung, wie sie auch zur Holzfeuchtemessung durchgeführt wird. Diese Messung beruht auf der Abhängigkeit zwischen dem Feuchtegehalt (und der Temperatur) und dem ohmschen Widerstand verschiedener Holzarten. Da der Feuchtegehalt eines hygroskopischen Materials wiederum direkt vom Umgebungsklima (Temperatur und Luftfeuchte) abhängig ist (Holzausgleichsfeuchte), entsteht somit auch eine Abhängigkeit des ohmschen Widerstands vom Umgebungsklima. Diese Abhängigkeit wurde hier instrumentalisiert, um von der Temperatur und dem ohmschen Widerstand ausgehend die relative Luftfeuchte an der jeweiligen Messposition zu berechnen.

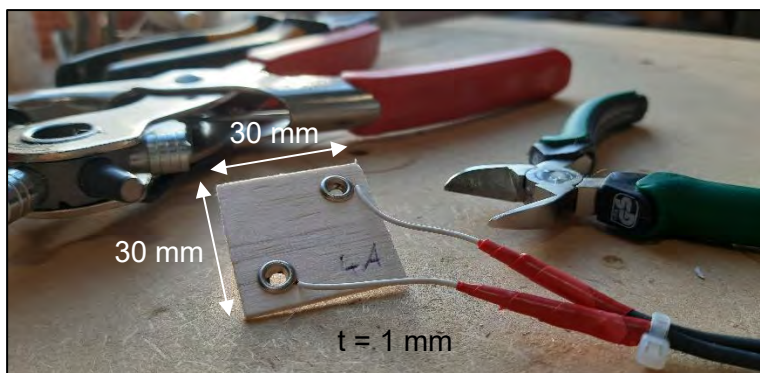


Abbildung 18: Fertiger Balsa-Sensor mit eingezeichneten Dimensionen.

Um eine möglichst direkte Reaktion des ohmschen Widerstands (bzw. des Feuchtegehalts) auf die instationären, fluktuierenden Umgebungsfeuchtebedingungen im Wandaufbau zu gewährleisten, kamen sehr dünne Balsaholzplättchen zum Einsatz ($d = 1 \text{ mm}$). Anhand von insgesamt 8 Sensoren, wurde eine für alle Balsaholz Sensoren repräsentative Kalibrierung im Klimaschrank bei verschiedenen Klimabedingungen ($1 \text{ }^\circ\text{C}$, $5 \text{ }^\circ\text{C}$, $10 \text{ }^\circ\text{C}$, $15 \text{ }^\circ\text{C}$, $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $25 \text{ }^\circ\text{C}$, $30 \text{ }^\circ\text{C}$, $40 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \text{ }^\circ\text{C}$ jeweils mit 20% , 30% , 50% , 80% , 90% , 95% RH) vorgenommen. Jedes Klima wurde bis für mindestens 1 Stunde gehalten. Zur Auswertung wurden die letzten 20 Minuten des jeweiligen Klimaintervalls herangezogen. Das Ergebnis der Kalibrierung waren die durchschnittlichen Isothermen der relativen Luftfeuchte in Abhängigkeit des ohmschen Widerstands (Abbildung 19). Mithilfe dieser Isothermen sollte die relative Luftfeuchte unterhalb der Putzschicht im Bauteil im Bereich zwischen 60% RH und 100% RH hinreichend genau berechnet werden.

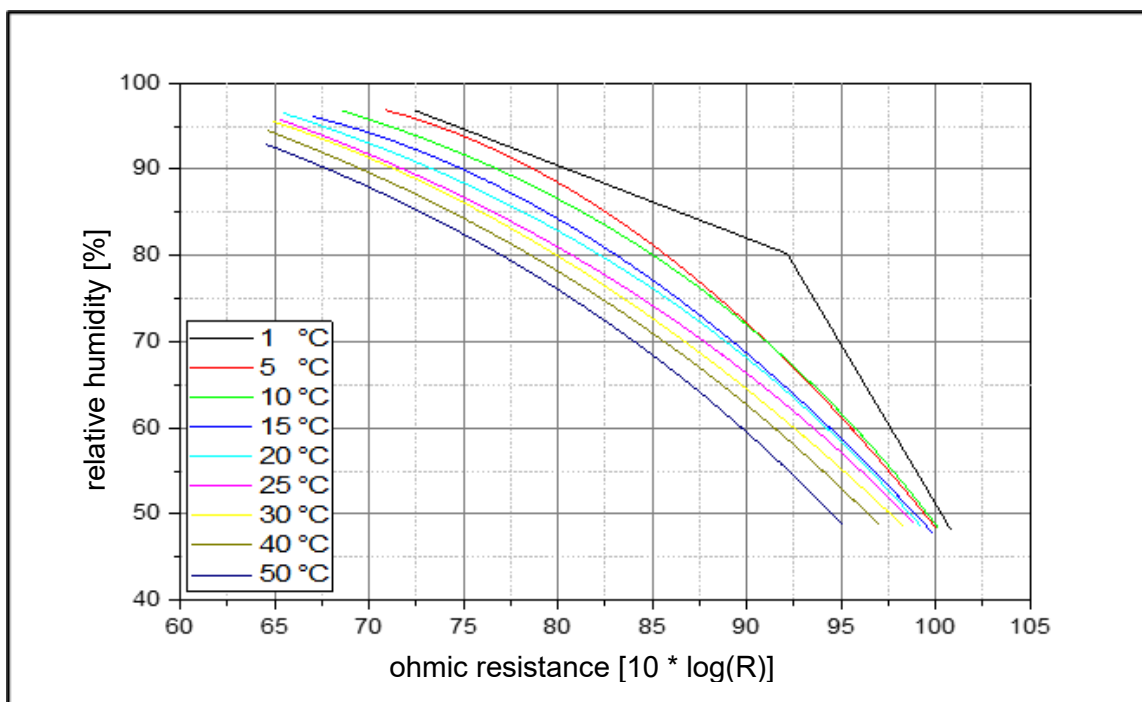


Abbildung 19: Isothermen der relativen Luftfeuchte in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte.

2.3.3 In-situ Wärmestrommessung

In Ergänzung zu den klimatischen Aufzeichnungen wurden ab Oktober 2021 Wärmestromaufzeichnungen an den Versuchswandaufbauten durchgeführt. Die Messungen wurden in sieben Variantenkonstellationen aufgeteilt. Bei diesen Konstellationen wurden jeweils die Wärmeströme von zehn bis zwölf Elementen parallel aufgezeichnet, um eine direkte Vergleichbarkeit der Varianten untereinander zu gewährleisten. Die Wärmestromplatten wurden auf die Innenbeplankung aufgebracht. Abbildung 20 zeigt beispielhaft den Aufbau der Messkonstellation 1 mit zehn Messstellen/Varianten. Um einen

optimalen Kontakt zwischen Wärmestromplatten und OSB Innenbeplankung zu ermöglichen, wurde jede Platte mit Wärmeleitpaste ($\lambda = 6 \text{ W/mK}$) beschichtet (Abbildung 21).



Abbildung 20: Messaufbau einer Wärmestrommessung mit Wärmestromplatten und Oberflächentemperaturen (Konstellation 1).



Abbildung 21: Wärmestromplatte mit aufgetragener Wärmeleitpaste ($\lambda = 6 \text{ W/mK}$).

Parallel dazu wurden die Außen- und Innentemperaturen an der Wandoberfläche (außen → Temperatur unterhalb der Putzschicht), sowie in Oberflächennähe (Entfernung ca. 10,5 cm) aufgezeichnet (Abbildung 22, Abbildung 23). Das genaue Sensorschema in Abhängigkeit der Fassadenvariante geht aus Abbildung 24 hervor.

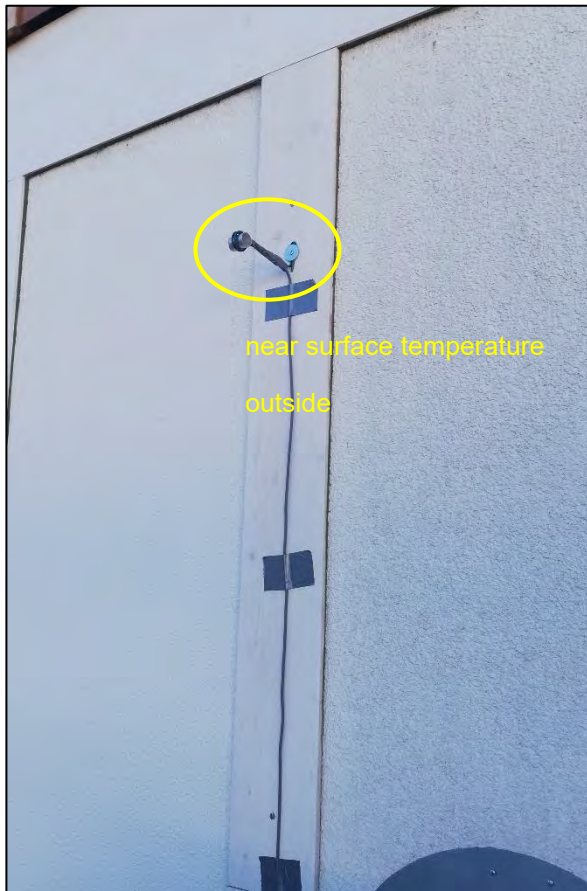


Abbildung 22: Oberflächennaher
 Temperatursensor an der
 Außenoberfläche mit
 Strahlungsschirm aus Aluminium.

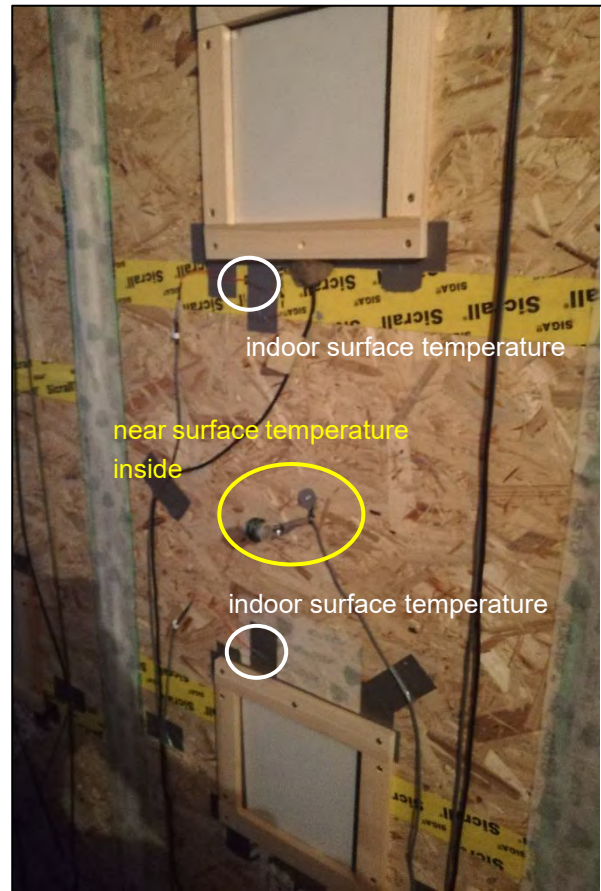


Abbildung 23: Sensorik an der Innenoberfläche
 der Versuchselemente:
 Oberflächennahe Temperatur,
 Oberflächentemperaturen und
 Wärmestromplatten.

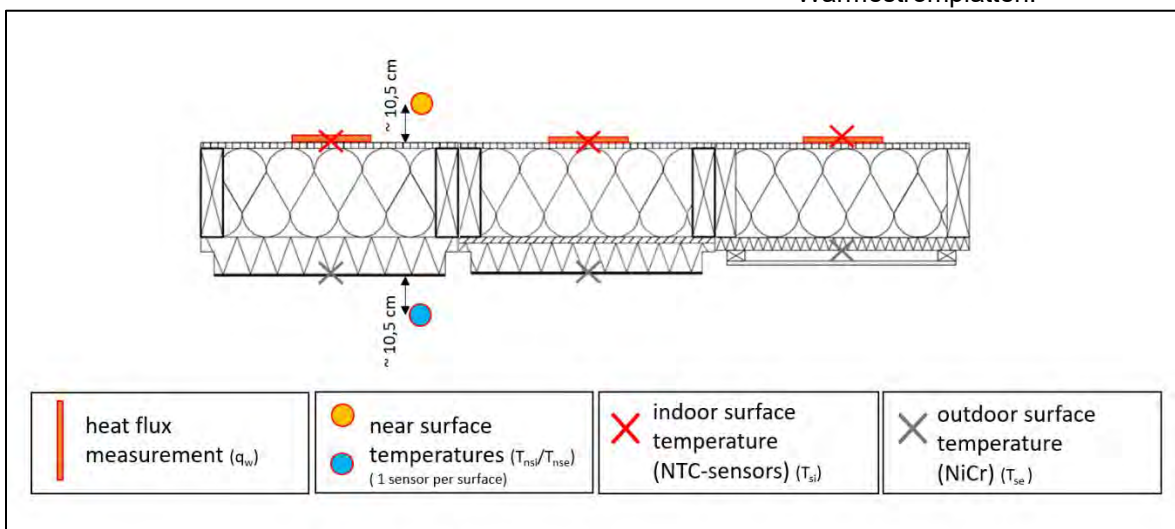


Abbildung 24: Angewendetes Sensorschema in Abhängigkeit der Fassadenausführung der Wärmestrommessungen.

Aus den Aufzeichnungen wurde der dynamische Wärmedurchlasskoeffizient (Λ -Wert) nach Gleichung 1 berechnet und zum qualitativen Vergleich der Aufbauvarianten herangezogen.

$$\Lambda = \frac{q_w}{T_{si} - T_{se}} \quad (1)$$

$\Lambda \rightarrow$ Wärmedurchlasskoeffizient der Wand $\left[\frac{W}{m^2K} \right]$

$q_w \rightarrow$ mittlerer gemessene Wärmestromdichte über gesamten Messzeitraum $\left[\frac{W}{m^2} \right]$

$T_{si}, T_{se} \rightarrow$ Oberflächentemperaturen (innen, außen) [K]

Neben dem Vergleich von Aufbauten mit verschiedenen Dämmstoffen (Gefachdämmung, WDVS-Dämmung), wurden auch Ausrichtungsvarianten (Nord und Süd), Fassadenvarianten (hinterlüftet/WDVS), und Farbvarianten (Putzfarbe) verglichen. In Tabelle 1 sind die verschiedenen Konstellationen und deren Fokus (Vergleichsvariablen) aufgelistet.

Tabelle 1: Übersicht zu den Wärmestrom-Messkonstellationen K1 bis K7, jeweils mit Datum, Laufzeit und jenen Variablen, auf denen beim Vergleich der Fokus gelegt wird

	Datum [von-bis]	Laufzeit [h]	Vergleichsvariablen
K1	13.10.21- 24.10.21	264	- WDVS-System (Holzfaser, EPS) - Vergleich der Dämmstoffe im Gefach (Mineralfaser, Holzfaservlies, Zelluloseeinblasdämmung, Schafwolle, Stroheinblasdämmung)
K2	28.10.21- 08.11.21	264	- Fassadenausführung (WDVS, vorgehängte Fassade) - Holzfaser-WDVS Dichte (140 kg/m ³ - 180 kg/m ³)
K3	09.11.21- 20.11.21	264	- Putzfarbe (HBW 79 / HBW 17) - Holzfaser-WDVS Dichte bzw. Herstellungsverfahren (140 kg/m ³ - 240 kg/m ³ bzw. Trockenverfahren und Nassverfahren)
K4	26.11.21- 07.12.21	264	- Vergleich Ausrichtung bei WDVS Fassade (Nord, Süd)
K5	08.12.21- 19.12.21	264	- Vergleich Ausrichtung bei vorgehängter Fassade (Nord, Süd) - Vergleich der Dämmstoffe im Gefach (Holzfaservlies, Schafwolle, Stroheinblasdämmung, Holzfasereinblasdämmung) - Vergleich Holzfaser-WDVS Dichte (140 kg/m ³ / 110 kg/m ³ / 180 kg/m ³)
K6	22.12.21- 02.01.22	264	- Vergleich Ausrichtung bei Vorhangfassade und WDVS (Nord/Süd) - Sonderaufbauten (W_2, W_3)
K7	05.01.2022- 01.02.2022	648 h	- WDVS-System (Holzfaser, EPS) - Vergleich der Dämmstoffe im Gefach (Mineralfaser, Holzfaservlies, Zelluloseeinblasdämmung, Schafwolle, Stroheinblasdämmung) - Sonderaufbauten (W_2, W_3) - Zeitraum (264 h, 672 h bzw. Vergleich K1 und K7)

2.4 Zielsetzung der Freilanduntersuchungen

Die Ziele der Freilanduntersuchungen lassen sich grob wie folgt zusammenfassen:

1. Erhebung von Messdaten an einem Gebäude im Realmaßstab zum qualitativen Vergleich der betrachteten Varianten untereinander im Hinblick auf die hygrothermische Performance (Wärmeleitfähigkeit, Dauerhaftigkeit)
2. Abgleich der Ergebnisse aus den Laboruntersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit mit den empirisch gemessenen Daten aus der Freilanduntersuchung
3. Erste praktische Anwendung des entwickelten Holzfäuleprognosemodells auf empirische Messdaten

Ad 1.) Anders als im Labor, wirkt sich bei einer Freilanduntersuchung im Realmaßstab die gesamte Bandbreite der Einflussparameter auf das individuelle Bauteilverhalten aus. Dazu gehören auch jene, die nicht, oder nur schwer zu erfassen sind (z.B. auftretende turbulente Strömungen/Verwirbelungen, Reflexionen durch Umgebung etc.). Diese Effekte wurden in der vorliegenden Untersuchung nicht erfasst. Der Einfluss dieser mehr oder weniger zufälligen Größen ist in den aufgezeichneten Messwerten dennoch enthalten. Die Freilanduntersuchung stellt deshalb eine gute Methode dar, um vergleichende Aussagen über die hygrothermische Performance der zugrundeliegenden Bauteilvarianten im realen Anwendungsfall machen zu können, bei dem sich viele Einflussgrößen überlagern, die im Labor nicht zur Gänze abgebildet werden können.

Ad 2.) Der Abgleich der Laboruntersuchungen mit den empirisch gemessenen Daten lässt Erkenntnisse zur Anwendbarkeit der im Labor ermittelten λ -Werte (Wärmeleitfähigkeit) auf den realen Anwendungsfall zu.

Ad 3.) Auf Basis des neu entwickelten Modells zur Vorhersage von Holzfäule werden Prognosen zum Holz- bzw. Zelluloseabbau in den verschiedenen Varianten des Freilandversuchs aufgestellt. Zum Abgleich werden Dämmstoffproben aus den Elementen entnommen und visuell auf holzzerstörende Pilze untersucht.

3 Dauerhaftigkeit von Naturfaserdämmstoffen

3.1 Laboruntersuchungen zur Dauerhaftigkeit

3.1.1 Beschreibung der Versuche

In Versuchsreihen im Labor wurden Holzfaserwerkstoffe im Vergleich zu Massivholz (Abbildung 25) mit verschiedenen Holzfäulepilzen beimpft und bei unterschiedlichen

Kombinationen aus relativer Feuchte und Temperatur exponiert. Untersucht wurden folgende Materialien:

- Faserdämmplatte, Nassverfahren, 160 kg/m³ [A in Abbildung 25]
- Faserdämmplatte, Trockenverfahren ohne Hydrophobierung, 150 kg/m³ [B]
- Faserdämmplatte, Trockenverfahren mit Hydrophobierung, 110 kg/m³ [C]
- Zellulosefaser, 50 kg/m³ [D]
- Kiefernspiltholz, Referenz (*Pinus sylvestris*) [E]

Die Probengröße betrug 50 mm x 50 mm bei 40 mm Dicke für die Dämmstoffe und 10 mm für die Referenzholzproben. Die Probekörper wurden je mit drei Löchern passenden Durchmessers versehen, um die mit Pilzkultur inkubierten Dübel aufnehmen zu können. Pro Material wurden 84 Probekörper untersucht.

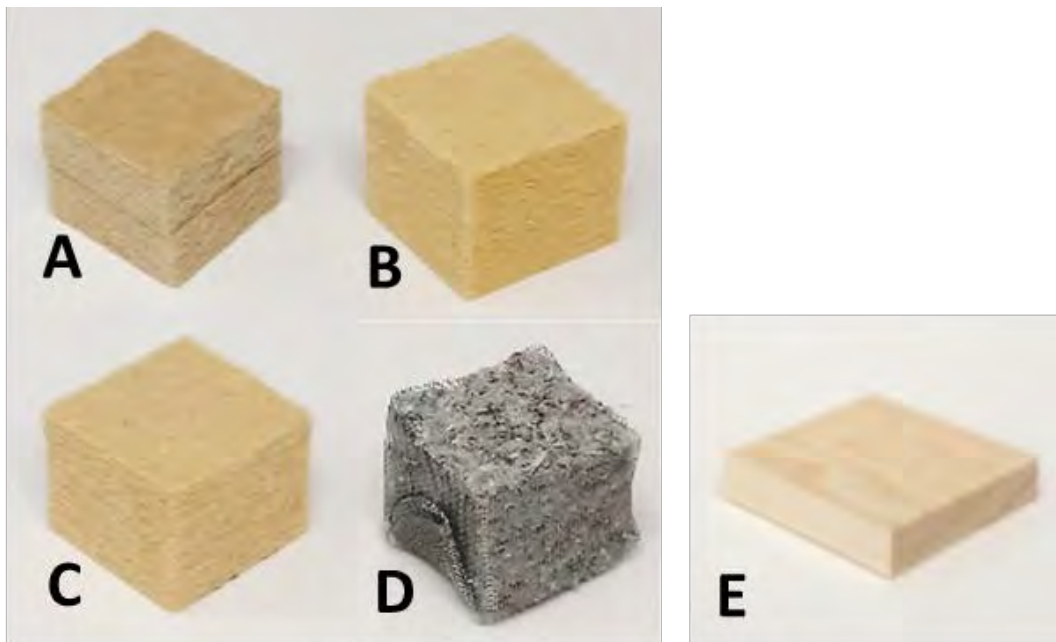


Abbildung 25: Untersuchte Holzfaserdämmstoffe (links) und Referenz-Kiefernspiltholz (rechts).

Zunächst wurden die Probekörper im Trockenschrank bei 60 °C und durchgehender Belüftung mit vorgetrockneter Luft über 48 Stunden getrocknet und dann die Trockenmasse bestimmt. Bei vielen Untersuchungen wie [5, 17, 18] aber auch gemäß einiger Normverfahren (z.B. EN 113-1 [19]) werden die Holzproben bei 103 °C für 24 Stunden getrocknet. Da nicht ausgeschlossen werden kann, dass derart hohe Temperaturen bei Faserdämmstoffen zu einer Veränderung des Materials und evtl. auch zu einer Reduktion der Befallswahrscheinlichkeit der Proben führen könnten, wird hier eine geringere

Temperatur bei längerer Dauer verwendet. Diese Vorgehensweise hat sich bereits für die Ermittlung der hygrothermischen Materialparameter im IBP-Labor bewährt.

Als Holzfäulepilze wurden die folgenden Spezies eingesetzt:

- Brauner Kellerschwamm (*Coniophora puteana*). Gängiger Norm-Prüfpilz mit hohem Abbaupotential; verursacht eine Braunfäule
- Schmetterlings-Tramete (*Trametes versicolor*). Ebenfalls gängiger Norm-Prüfpilz; verursacht eine Weißfäule.
- Gemeiner Spaltblättling (*Schizophyllum commune*). Laut Literatur hohe Affinität zu Fasermaterialien; verursacht eine Weißfäule.

Für die Beimpfung der Probekörper wurden die Pilze zunächst auf Malzextrakt-Agar angezchtet, „Dübel“ aus unbehandeltem Nadelholz mit ca. 1 cm Länge daraufgelegt und für vier Wochen inkubiert (Abbildung 26). Die Probekörper wurden nach Sterilisierung mit Gamma-Strahlung zunächst in den Zielklimaten bis zum Erreichen der Sättigungsfeuchte konditioniert und anschließend mit je einem Dübel pro Organismus, also insgesamt jeweils drei Dübeln pro Probekörper, versehen.



Abbildung 26: oben links - Vorbereitung von infizierten Holzdübeln (oben links: *Schizophyllum commune*, oben rechts: *Coniophora puteana*, unten: *Trametes versicolor*) und rechts mit Dübeln „beimpften“ Probekörper.

Im Anschluss daran wurden sie in Inkubationseinheiten (dicht verschlossene Behälter, siehe Abbildung 27) für einen Zeitraum von maximal 12 Monaten folgenden Klimabedingungen ausgesetzt:

- 97 % r. F. bei 10 °C, 15 °C, 25 °C und 30 °C
- 100 % r. F. bei 10 °C und 15 °C

Zur Einstellung der Feuchten wurden Schalen mit dafür geeigneten Flüssigkeiten in den Inkubationseinheiten eingebracht. Für 97 % kamen Kaliumsulfat-Salzlösungen (K_2SO_4) und für 100 % destilliertes Wasser zum Einsatz.



Abbildung 27: Inkubationseinheit mit beimpften Probekörpern. Unter dem Gitter befindet sich die mit Salzlösung bzw. destilliertem Wasser gefüllte Schale.

In definierten Intervallen wurden jeweils drei Probekörper entnommen und gewogen, um die Sorptionsfeuchte zu ermitteln. Sie wurden anschließend wiederum bei 60 °C für zwei Tage getrocknet und die Masseverluste bestimmt. Die Zeitpunkte der Probenentnahme sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Stichprobenartig wurden auch die Referenzprobekörper aus Kiefer-Splintholz bei Randbedingungen zum Vergleich mitgeprüft, bei denen aufgrund der bisherigen Angaben aus der Literatur ein deutlicher Masseverlust zu erwarten war: Bei den höheren Temperaturen von 25 und 30 °C in Kombination mit 97 % r.F. sowie bei hoher relativer Feuchte von 100 % auch bei 15 °C.

Tabelle 2: Klimate und Zeitpunkte der Probenahme für die Massenbestimmung der Dämmstoffproben. Die Zeitpunkte der Probenentnahme für das Referenzholz (Kiefer-Splintholz) sind mit * gekennzeichnet.

Klima		Probennahme nach
Temperatur	r.F.	
10 °C	97%	6, 8, 10, 12 Monaten
	100%	4, 6, 8, 10 Monaten
15 °C	97%	5, 7, 9, 12 Monaten
	100%	3, 5*, 7, 10* Monaten
25°C	97%	4*, 6* Wochen und 2*, 3*, 5*, 8* Monaten
30°C	97%	3*, 5*, 7*, 10* Wochen und 4*, 6* Monaten

3.1.2 Ergebnisse

Alle bei 25 °C und 97 % r.F. inkubierten, nicht mit Pilzen beimpften Dämmstoffproben (= Korrekturproben) wiesen nach 7 Monaten materialspezifische, geringe Masseverluste auf. Mit 2,4 M.-% traten die höchsten Masseverluste bei der im Trockenverfahren hergestellten Dämmstoffplatte ohne Hydrophobierung auf. Lediglich die Masse des als Referenz eingesetzten Kiefer-Splintholzes blieb während der Inkubationszeit unverändert (Tabelle). Den Ursachen für die aufgetretenen Masseverluste konnte im Rahmen der Untersuchungen nicht nachgegangen werden. Vermutet wird, dass flüchtige Verbindungen aus den Dämmmaterialien ausgasen, oder bei der Herstellung eingebrachte Zusatzstoffe durch das feuchte Milieu während der Inkubation in Lösung gehen.

Jedenfalls ist dieser nicht auf biogenen Abbau zurückzuführende Verlust an Masse bei der Berechnung und Bewertung der Proben, die den holzabbauenden Pilzen ausgesetzt waren, zu berücksichtigen. Dies erfolgte durch die auf Basis der Korrekturproben ermittelten und in Tabelle 3 angeführten materialspezifischen Korrekturwerten, die von den Masseverlusten an den mit Pilzen beimpften Dämmstoffproben abgezogen wurden. In Abbildung 28 ist dies beispielhaft an den bei 25 °C und 97 % r.F. durchgeführten Versuchen dargestellt.

Tabelle 3: Masseverluste der nicht mit Pilzen beimpften Dämmstoff- und Holzproben (Korrekturproben) nach 7 Monaten Inkubation bei 25 °C und 97 % r.F.

Material	Masseverlust [M %]
Nassverfahren ohne Hydrophobierung	0,7
Trockenverfahren ohne Hydrophobierung	2,4
Trockenverfahren mit Hydrophobierung	1,1
Zellulosedämmstoff, borhaltig	0,5
Kiefer-Splintholz (Referenz)	0,0

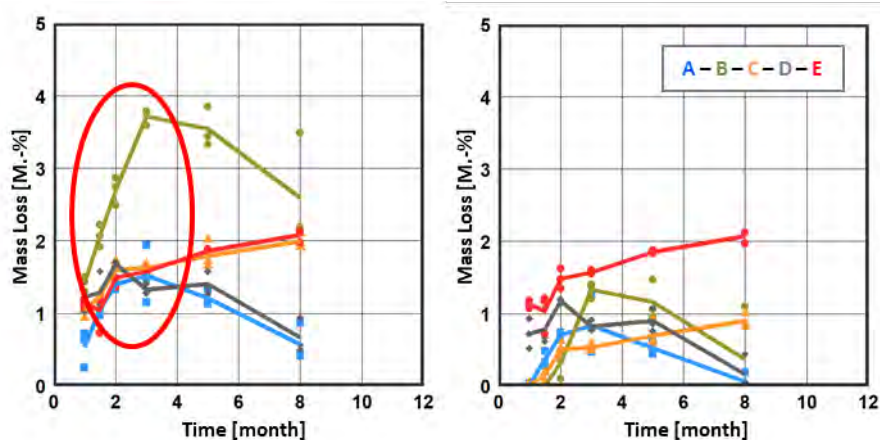


Abbildung 28: Masseverlust der bei 25 °C und 97 % r.F. inkubierten Proben gesamt (links) und korrigiert um die bei den Korrekturproben ermittelten Masseverluste (rechts)
(A = Nassverfahren; B = Trockenverfahren ohne Hydrophobierung; C = Trockenverfahren mit Hydrophobierung; D = Zellulose; E = Kiefer-Splintholz)

Der in Abbildung 28 erkennbare, augenscheinlich unerklärliche Rückgang der Masseverluste von 3 Dämmmaterialien zwischen 3 und 8 bzw. 5 und 8 Monaten, kann auf die oft große Streuung biologischer Daten zurückgeführt werden. Im vorliegenden Beispiel liegt diese bei etwa 1,5 M.-%. Dementsprechend erscheint es gerechtfertigt, einen Bereich von bis zu 1,5 % Masseverlust als Grenze für die Ungenauigkeit der Messung einzuschätzen. In der Ergebnisdarstellung in Abbildung 29 und Abbildung 30 ist dieser Bereich daher transparent rot markiert.

Eine weitere versuchsimmanente Unschärfe ergab sich durch die Einstellung der r.F. von 97 % mit einer gesättigten Lösung von K_2SO_4 , wie in Abschnitt 3.1 angegeben. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Prozesses, stellt sich bei 10°C eine r.F. von $98,2 \pm 0,8$ %, bei 15 C von $97,9 \pm 0,6$ %, bei 25 C von $97,3 \pm 0,5$ % und bei 30 °C von $97,0 \pm 0,4$ % ein [20]. Daraus ist ersichtlich, dass die relativen Soll-Feuchten nicht exakt erreicht werden konnten und je nach eingestellter Temperatur zwischen $97,0 \pm 0,4$ % und $98,2 \pm 0,8$ % schwankten.

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen sind in Abbildung 29 und Abbildung 30 grafisch dargestellt. Wie den Abbildungen zu entnehmen ist, kam es bei 97 % r.F. und Temperaturen

von 10°C, 15°C, 25°C und 30°C zu keinem bzw. nur zu minimalem Masseabbau an den untersuchten Dämmmaterialien. Abgesehen von einem einzigen Ausreißer-Wert (der im Nassverfahren hergestellten Dämmstoffplatte ohne Hydrophobierung, bei 15°C nach ca. 6,5 Monaten), lagen alle Masseverluste unter 1,5 M.-%. Selbst bei den für Pilzwachstum idealen Temperaturen von 25 C und 30 C, lagen die maximalen Masseverluste mit 1,5 M.-% im Bereich der Messungenaugigkeit und in allen Fällen unter dem ermittelten Masseverlust des Kiefer-Splintholzes.

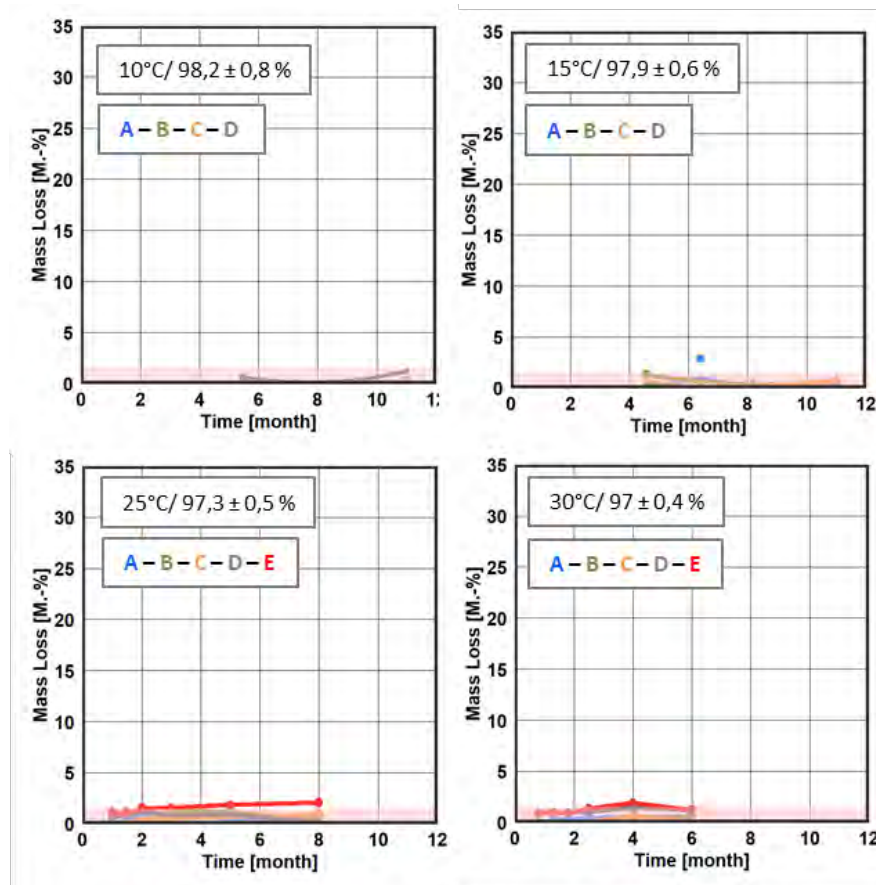


Abbildung 29: Masseverlust der bei 25 °C und 97 % r.F. inkubierten Proben gesamt (links) und korrigiert um die bei den Korrekturproben ermittelten Masseverluste (rechts) (A = Nassverfahren; B = Trockenverfahren ohne Hydrophobierung; C = Trockenverfahren mit Hydrophobierung; D = Zellulose; E = Kiefer-Splintholz, transparent rot markiert = Bereich der Messungenaugigkeit von 1,5 M.-%)

Bei 100 % r.F. und 10°C und 15°C wies die Zellulosefaser („D“ in Graphiken) zu keinem Zeitpunkt Masseverluste auf. Bei den beiden im Trockenverfahren hergestellten Dämmmaterialien mit und ohne Hydrophobierung (jeweils C und B) kam es im Zeitverlauf zu geringen Masseverlusten. Dabei schnitt das hydrophobierte Dämmmaterial geringfügig besser ab als das nicht hydrophobierte. Beide Dämmstoffplatten zeigten jedoch geringere Masseverluste als die Kiefer-Splintholz Referenz. Lediglich die im Nassverfahren hergestellte Dämmplatte ohne Hydrophobierung wies bei 100 % r.F. und 10°C sowie 15°C im Zeitverlauf höheren Masseabbau auf als die Kiefer-Splintholz Referenz.

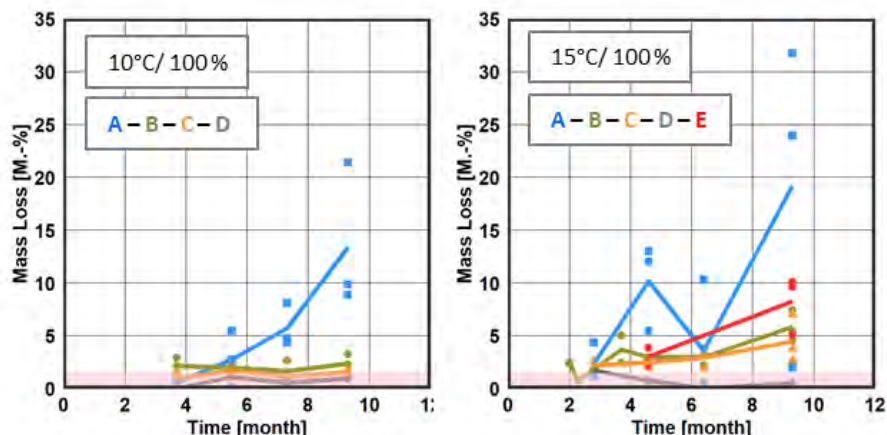


Abbildung 30: Masseverluste der bei 10 °C und 15 °C sowie 100 % r.F. durchgeführten Versuche. (A = Nassverfahren; B = Trockenverfahren ohne Hydrophobierung; C = Trockenverfahren mit Hydrophobierung; D = Zellulose; E = Kiefer-Splintholz), transparent rot markiert = Bereich der Messgenauigkeit von 1,5 M.-%)

Anzumerken ist, dass bei der vorliegenden Untersuchung bei 97 % r.F. und 10 bzw. 15 °C kaum Masseverlust messbar waren. In [17] wurde dagegen bei 97 % r.F. und in [18] bereits bei 94 % r.F. ein signifikanter Masseverlust angegeben. Diese Diskrepanz zieht sich durch die Literatur: einige Autoren stellen fest, dass bei solchen Feuchten noch gar kein Masseverlust möglich ist, andere messen diesen bereits, weisen aber auch auf die Unsicherheit bei der Einstellung der Feuchte im Labor, teilweise Tauwasserbildung während der Versuche sowie auf mögliche andere Feuchtequellen hin, die im Probekörper ggf. eine höhere Feuchte als die Ausgleichsfeuchte erzeugen konnten.

Ein Vergleich mit weiteren Informationen aus verschiedenen Literaturen in Tabelle 4 zeigt, dass Untersuchungen mit Inkubation und zusätzlichem Nährstoffangebot die größten Masseverluste von 6 bis 15 M.-% pro Monat erzeugen (Untersuchungen 3 bis 8 in der Tabelle), deutlich geringer bleiben diese mit nur etwa 1 bis 4 M.-% pro Monat bei Inkubation ohne zusätzliches Nährstoffangebot (Untersuchungen 9 bis 11) und nochmals dahinter liegen mit 0,03 bis 0,6 M.-% pro Monat die Versuche, bei denen gar keine Beimpfung erfolgte, sondern eine „normale“ Etablierung der Pilze über die prinzipiell immer in der Luft und auf dem Material verfügbaren Sporen (Untersuchungen 1 und 2) abgewartet wurde – obwohl hier extrem hohe Holzfeuchten von 40 bis 70 M.-% eingestellt wurden. Die Versuchsbedingungen unterscheiden sich allerdings auch bezüglich anderer Versuchsparameter wie Temperatur, Luftfeuchte und Verhältnis von Pilzmasse zu Probekörpermasse. Auch die verwendeten Pilzarten sowie die Holzprobekörper selbst sind verschieden. In kaltem Klima langsam gewachsene Nadelhölzer gelten als beständiger als in warmem Klima schneller gewachsene. Offensichtlich führt jede Konstellation zu unterschiedlichen Ergebnissen, was eine einheitliche Interpretation sehr schwierig macht.

Tabelle 4: Vergleich von Untersuchungsmethoden und Holzabbaugeschwindigkeit. Die Holzabbaugeschwindigkeit ist basierend auf den Untersuchungsergebnissen von

Literaturen (Nr. 1-9) und aus den in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen (Nr. 10-11) ausgerechnet. Zum intuitiven Vergleich ist die Holzabbaugeschwindigkeit mit stufenweise intensiver Farbenskala dargestellt.

Nr.	Holzart	Pilzart	Inkubation	Proben- größe [mm]	Tem- peratur	Rel. Feuchte	Holz- abbau- Geschwin- digkeit [M.-% / Monat]	Quelle	
1	<i>Tsuga canadensis</i> (kanadische Helmlocktanne) 40 M.-% WG*	nicht bestimmt	Exponiert in der unbehandelten Raumluft	50 x 60 x 20	28 °C	~ 100 %	0.03	[21]	
2	<i>Tsuga canadensis</i> (kanadische Helmlocktanne) 70 M.-% WG*			50 x 60 x 20		~ 100 %	0.6		
3	<i>Pinus densiflora</i> (japanische Rotkiefer)	<i>Fomitopsis palustris</i>	Gelegt auf dem gewachsenen Myzel auf Agar	k.A.		k.A.	15.0	[22]	
4	<i>Cryptomeria japonice</i> (Sicheltanne)			5 x 5 x 20		k.A.	9.8	[23]	
5	<i>Cercidiphyllum japonicum</i> (japanischer Kuchenbaum)			5 x 5 x 20		k.A.	13.7		
6	<i>Picea sitchensis</i> Sitka Fichte)			<i>Trametes versicolor</i>		20 x 20 x 100	~ 100 %	13.0	[24]
7	<i>Picea abies</i> (Fichte)						~ 100 %	8.6	
8	<i>Picea abies</i> (Fichte)	<i>Coniophora puteana</i>	5 x 5 mm ² Myzel mit Agar auf Proben draufgelegt.	7 x 15 x 50	100%	6.2	[17]		
9	<i>Pinus densiflora</i> (japanische Rotkiefer)	<i>Fomitopsis palustris</i>	Nach Etablierung von Myzel auf Proben getrennt von Agar	20 x 20 x 20	100%	4.4	[25]		
10	<i>Pinus sylvestri</i> Kiefer-Splintholz	<i>Coniophora puteana</i> , <i>Trametes versicolor</i> , <i>Schizophyllum commune</i>	Gesteckt mit bereits jeweils von einem Pilz etablierten Dübel	40 x 40 x 10	15 °C	97 %		0	
11					30 °C	100%	1.0	aktuell	
					30 °C	97%	0.2		

*WG = Wassergehalt

Während ein signifikantes externes Nährstoffangebot in Baustoffen unwahrscheinlich ist, kann das Vorhandensein von geringen Mengen an Myzel im Einzelfall nicht ausgeschlossen werden. Das im aktuellen Projekt gewählte Inkubationsszenario erscheint daher auf der einen Seite als Worst-Case-Annahme für die Praxis sinnvoller als die Untersuchung ganz ohne Inkubation, aber realitätsnäher als die Ergebnisse der Untersuchungen mit Nährstoffübertrag. Auch die Verzögerung bis zum Start des Masseabbaus lässt sich nur schwer quantifizieren. Hier wird bei einigen Untersuchungen erst ein Masseverlust von 5 % als signifikant angesehen und herangezogen; andere Untersuchungen verwenden 3 M.-%. Im aktuellen Projekt wurde eine Grenze von 1,5 M.-% gewählt.

3.2 Ableitung von Grenzkurven und Entwicklung eines instationären Prognosemodells

Ziel ist es, aus den Laborversuchen temperatur- und feuchteabhängige Grenzkurven (Grenz-Isoplethen) für unterschiedlich beständige Naturfaserdämmstoffe abzuleiten. Diese basieren auf den früher am IBP im Rahmen von [26] ermittelten Grenzkurven für Massivholz sowie auf dem prinzipiellen Verlauf von Pilz-Isoplethen, die für Schimmelpilze in [27] entwickelt wurden. Aufbauend auf den unteren Grenzisoplethen, ab denen Holzfäulepilze gerade zu wachsen beginnen können, kann dann indirekt die Wachstumsgeschwindigkeit über die für die Bewertung relevanten Massenverluste mit Hilfe des in Entwicklung befindlichen instationären Prognosemodells WUFI® HzP (**H**olzzerstörende **P**ilze) prognostiziert werden.

3.2.1 Bisherige Untersuchungen zu minimalen Wachstumsvoraussetzungen

In Abbildung 31 sind die Grenzkurven gemäß den Ergebnissen aus den 2016 am IBP durchgeführten Untersuchungen [26], nach Viitanen [28], die aktuell für die Bemessung verwendete Kurve nach WTA-Merkblatt 6-8 [7] sowie die bei der Literaturrecherche im Rahmen von [26] ermittelte Bandbreite der minimalen Wachstumsbedingungen für holzerstörende Pilze einander gegenübergestellt. Alle Grenzkurven beziehen sich auf das Wachstum holzerstörender Pilze in Weichholz, und zwar meist im empfindlicheren Splintholz von Kiefer oder Fichte.

Der Bereich unter der grauen Grenzkurve nach Viitanen [28] wird vom Autor als auch dauerhaft sicherer Bereich zur Vermeidung von Masseabbau in Weichholz durch holzerstörende Pilze angegeben. Allerdings wurde damals aus entsprechenden Normen erst ein Masseverlust ab 5 % als signifikant angesehen, so dass die Kurve bei genauerer Interpretation bedeutet, dass unterhalb der Kurve nicht mit gar keinem, sondern mit nicht mehr als 5 M.-% Materialverlust zu rechnen ist. Dementsprechend hat Viitanen in späteren Publikationen meist etwas niedrigere Kurven angegeben.

Auf Basis der Untersuchungen von Viitanen wurde 2016 im WTA-Merkblatt 6-8 [7] eine temperaturabhängige Grenzkurve für Bemessungszwecke (grün gepunktet) im Holzbau etabliert, die mit erkennbar höheren Sicherheiten u.a. von [29] aus den Ergebnissen von Viitanen abgeleitet wurde. Da der Verlauf von Pilz-Isoplethen normalerweise nicht linear ist, wurde durch Anfangs- und Endpunkt hier zusätzlich eine typische Isoplethenkurve (grün) ergänzt.

Die beiden dunkelblauen Kurven stellen die in [26] geprüften Bedingungen dar. Die untere Kurve stellt die höchsten geprüften Bedingungen dar, bei denen noch keine Aktivität von Holzfäulepilzen (Anstieg der CO₂-Konzentration) feststellbar war, die obere Kurve zeigt dann die Bedingungen, bei denen erste Pilzaktivität messbar war. Der schraffierte Bereich wurde nicht genauer untersucht – die tatsächliche untere Grenzkurve wird also vermutlich etwas höher liegen als die untere dunkelblaue Kurve, trotzdem wird diese als Basis für die weiteren Untersuchungen als untere Grenze mit etwas Sicherheit herangezogen.

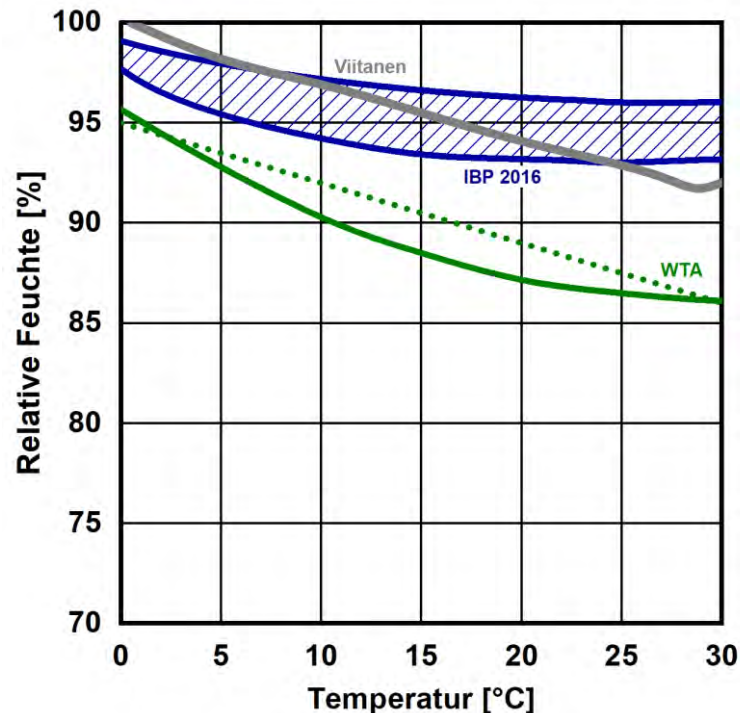


Abbildung 31: Minimale für den Abbau von Massivholz in verschiedenen Quellen als erforderlich angegebene Kombinationen von Temperatur und relativer Luftfeuchte.

Da bereits im Projekt In2EuroBuild [30] festgestellt wurde, dass es Holzfaserdämmungen gibt, die genauso beständig oder sogar beständiger gegen Pilzbefall sind als Massivholz, wird davon ausgegangen, dass diese Kurve auch für einige Naturfaserdämmungen als Grenzkurve geeignet ist und herangezogen werden kann.

3.2.2 Festlegung der Grenzkurven für Naturfaserdämmstoffe

Die im Rahmen des aktuellen Projekts mitgemessenen Referenzholzprüfkörper bestätigen die Sicherheit der Grenzkurve für Massivholz aus dem früheren Projekt des IBP aus 2016. Bei den unter der Grenzkurve liegenden Bedingungen wurde in keinem Fall Materialabbau verzeichnet – im Gegenteil war dies sogar bei einigen deutlich über der Grenzkurve liegenden Bedingungen auch über mehrere Monate nicht der Fall. Der Unterschied zu früheren Untersuchungen [28] könnte u.a. darin liegen, dass die Beimpfung nicht durch flächiges Auflegen von auf Agar angezüchtetem Myzel auf den Probekörper erfolgt, sondern ein Weichholzdübel übertragen wird, der vorher auf ein eingewachsenes Myzel ohne Kontakt zum Nährboden aufgelegt und überwachsen wurde. Das hat zwei Effekte: es wird kein Nährboden übertragen und das Verhältnis Pilzmasse zu Probekörpermasse ist geringer. Der fehlende Nährboden kann das initiale Wachstum verzögern, das geringere Verhältnis der Pilz- zur Probekörpermasse verlangsamt den Masseabbau. Vermutlich führt jedes Versuchsszenario infolgedessen zu etwas unterschiedlichen Dauern und Masseabbauraten.

Für den initialen Bewuchs sollten aber bisher verwendete Versuchsszenarien auf der sicheren Seite liegen, da hier bereits lebendes Myzel mit dem Probekörper in Kontakt gebracht wird, während im realen Einbauzustand der Pilz erst noch keimen muss, bevor er wachsen kann. Dementsprechend kann die unterste Grenzkurve für das Wachstum der holzzerstörenden Pilze auf Massivholz mit den neuen Ergebnissen nochmals als abgesichert angesehen werden und sowohl zur Festlegung des sicheren Bereichs unterhalb dieser Grenzkurve als auch zur Prognose des Wachstums mit dem neuen Modell oberhalb der Grenzkurve herangezogen werden. Für die im Rahmen der Versuche überprüften Holzfaserdämmstoffe mit gleich hoher oder höherer Beständigkeit als Massivholz kann ebenfalls diese Kurve verwendet werden – dementsprechend wird sie in Abbildung 32 als Kurve „ThermNat II“ eingeführt.

Allerdings sind nicht alle untersuchten Materialien beständiger als Holz. Eine im Nassverfahren hergestellte, nicht hydrophobierte Holzfaserdämmplatte erweist sich zumindest bei den höheren relativen Feuchten von 100 % als weniger beständig als Holz (siehe Abbildung 30). Es fällt jedoch auf, dass die gleiche Platte bei 97 % r.F. mit Ausnahme eines Messpunkts jeweils einen geringeren Masseverlust aufzuweisen scheint als Holz (Abbildung 29 unten). Hier stellt sich die Frage, wie dieses Material behandelt werden kann. Bisher liegt dem Modell die Annahme zugrunde, dass ein Material entweder immer beständiger oder immer unbeständiger ist als ein anderes, aber sich nicht bei unterschiedlichen Feuchten abweichend verhält. Um dieses Verhalten im Modell abzubilden, wären für jedes Material eigene Kurven mit dem entsprechenden Messaufwand erforderlich. Daher wurde entschieden, zumindest zum aktuellen Zeitpunkt an der zuvor genannten Analogie festzuhalten und die Nassverfahrensplatte damit auf der sicheren Seite liegend einheitlich als weniger beständig gegen Holzfäulepilze einzustufen als das Massivholz. Da hier keine geeigneten Messstufen vorliegen, wurde die Kurve ThermNat I zur Sicherheit auf das Niveau der WTA-Kurve gesetzt, Dabei liegen die Grenzwerte deutlich niedriger und bei 30 °C startet der Abbau bereits ab 86 %

r.F. Dies ist zwar unrealistisch niedrig, um jedoch realistischere Verläufe angeben zu können, wären weitere und detailliertere Untersuchungen erforderlich. Daher bleibt aktuell dieses niedrige Niveau ohne Alternative, bis weitere Erkenntnisse vorliegen. Trotzdem liegt auch diese Grenzkurve noch deutlich höher als der bisher zur Verfügung stehende Grenzwert von temperaturunabhängig 18 M.-%.

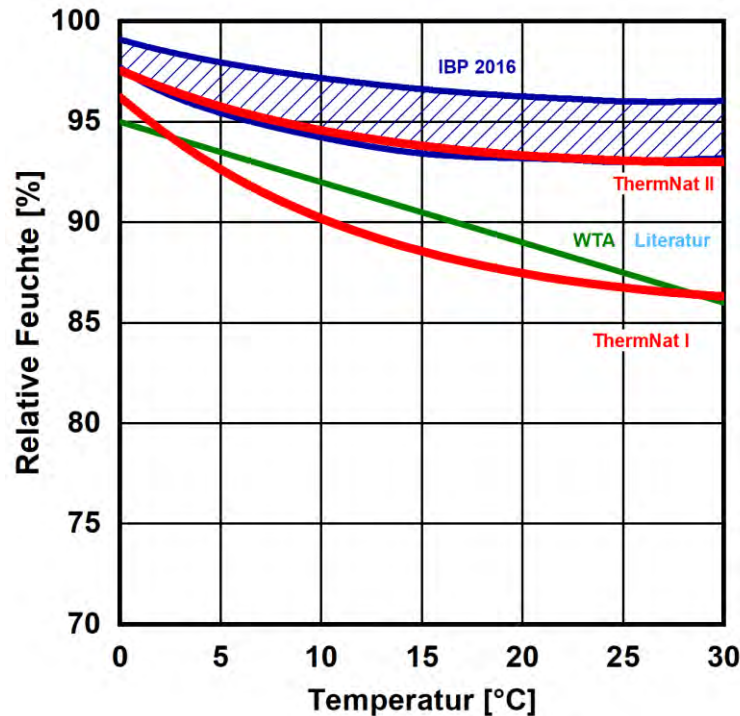


Abbildung 32: Neu ermittelte Grenzkurven für Massivholz und gleich beständige oder beständigere Naturfaserdämmstoffe (ThermNat II) sowie auf der sicheren Seite liegend für weniger beständige Naturfaserdämmstoffe (ThermNat I). Die Grenzkurven aus den eigenen Untersuchungen [26] (blau) und die Grenzkurve aus dem WTA-Merkblatt 6-8 (grün) sind zum Vergleich ebenfalls hinterlegt.

3.2.3 Holzabbau-Prognosemodell WUFI® HzP auf Basis des Biohygrothermisches Schimmel-Prognosemodells WUFI® Bio

Für die Beurteilung von Schimmelpilzwachstum auf Bauteilinnenoberflächen wurde am Fraunhofer IBP ein physikalisch-empirisches Modell [27] entwickelt, das die Auskeimung einer Pilzspore und die anschließende Entwicklung des Pilzmyzels in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte, deren Einwirkungsdauer, sowie vom Nährstoffangebot des Oberflächenmaterials prognostiziert. Die Keimungs- und Wachstumsbedingungen beziehen sich dabei nicht auf eine einzelne Pilzart, sondern fassen die kritischen Wachstumsbedingungen typischer, auf Bauteiloberflächen isolierter Pilzspezies auf der sicheren Seite zusammen. Der erste Teil der Prognose bezieht sich auf die Aufnahme, Abgabe und Speicherung von Feuchte der Modellspore anhand des feuchtevariablen Diffusionswiderstands der Sporenwand und deren Feuchtespeicherfunktion bis zum Erreichen des temperaturabhängig kritischen Grenzwassergehalts, bei dem die Spore auskeimt. Die Parameter der Modellspore (Abbildung 33 oben) wurden so

ermittelt, dass die Keimungsdauer der verschiedenen Spezies rechnerisch abgebildet werden kann. Der Grenzwassergehalt wird für das jeweilige Nährstoffangebot aus den temperaturabhängig minimal erforderlichen relativen Feuchten aus den Laborversuchen abgeleitet (Abbildung 33 unten). Nach erfolgter Keimung erfolgt ein Wechsel der Simulation auf den zweiten Teil mit Prognose des Myzelwachstums. D.h. sobald Keimung möglich war, geht das Modell vom Vorhandensein eines lebenden Myzels aus, das sich entsprechend weiterentwickeln kann.

Model spore properties

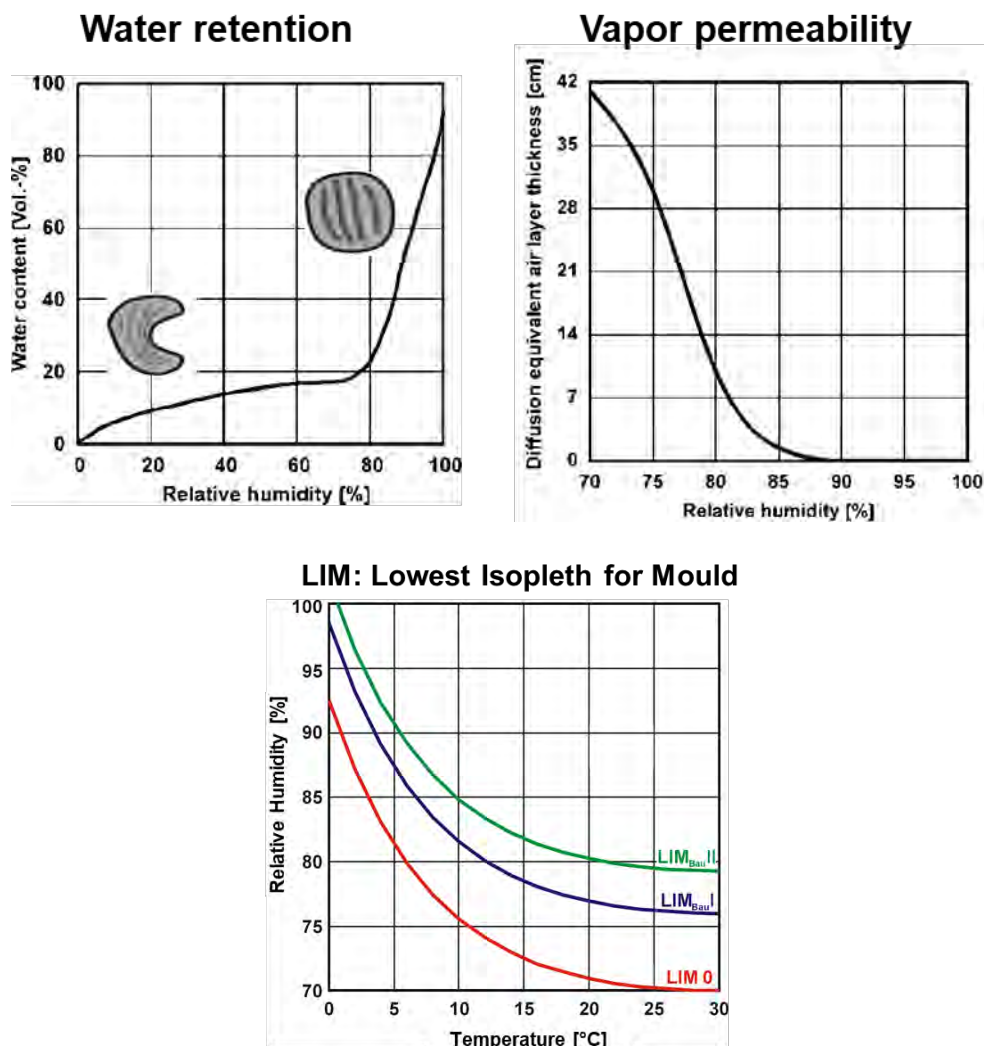


Abbildung 33: Sorptionsisotherme (oben links) und Diffusionswiderstand der Sporenwand (oben rechts) der Modell-Pilzspore des Schimmelpilz-Prognosemodells WUFI® Bio. Die Grenzkurven „Lowest Isopleth for Mould“ für je nach Nährstoffangebot unterschiedlich anfällige Materialien (Klasse 0 für optimalen Nährboden und die Klassen Bau I und Bau II für biologisch verwertbare bzw. nicht verwertbare Baustoffe).

Das biohygrothermische Modell ebenso wie das mathematisch-empirische VTT-Modell von Viitanen [31] sind in der Praxis bereits seit gut zwei Jahrzehnten regelmäßig eingesetzte und bewährte Verfahren, die eine nochmals deutlich zuverlässigere Prognose des Schimmelpilzrisikos ermöglichen als stationäre, temperaturabhängige Grenzkurven oder nur feuchteabhängige Grenzwerte wie der in vielen Normen etablierte Wert von 80 % r.F. für den winterlichen Wärmeschutz.

Bereits im Projekt [26] wurde gezeigt, dass deutliche Analogien zwischen dem Wachstum von Schimmel- und Holzfäulepilzen bestehen, auch wenn die Holzfäulepilze zumindest bei höheren Temperaturen ein höheres Feuchteniveau benötigen als Schimmelpilze [32]. Dementsprechend wurde das Modell WUFI® Bio als Grundlage für ein neues Modell zur Prognose des Wachstums holzerstörender Pilze WUFI® HzP herangezogen. Dazu wurde zunächst die zuvor beschriebene Grenzkurve für das Wachstum von Holzfäulepilzen in Massivholz herangezogen. Anders als bei Schimmelpilzen, findet das Wachstum der holzerstörenden Pilze innerhalb der Materialien statt und ist dementsprechend nicht direkt unter dem Mikroskop beobachtbar. Für die Detektion erster Wachstumsaktivitäten wurde daher in [26] die CO₂-Konzentration verwendet. Auch das anschließende Myzelwachstum lässt sich aus denselben Gründen nicht in gleicher Weise quantifizieren wie bei Schimmelpilzen. Stattdessen wird hierfür der messbare Masseverlust des Holzes herangezogen. Beide Effekte sind erst später beim Wachstum der Holzfäulepilze als Auskeimung der Spore und Myzelwachstum beim Schimmel zu beobachten. Die ersten Aktivitäten entziehen sich hier der Beobachtung. Trotzdem verbleibt die prinzipielle Analogie. Die Verzögerung bis zur Etablierung des Pilzes im Material (Initiationsphase) und der anschließend einsetzende Materialabbau. Beides kann in der bestehenden Systematik abgebildet werden.:

- 1.) Diffusionswiderstand und Sorptionsisotherme der Spore bis zum Erreichen der kritischen Feuchte, bei der der Pilz im Material ausreichend etabliert ist.
- 2.) Durch die anschließende Geschwindigkeit des Abbaus des Holzes.

Für die Dauer der Initiationsphase (Dauer bis zum ersten Masseverlust) liefert [17] einen Berechnungsansatz, mit dem diese für beliebige Randbedingungen aus Temperatur und relativer Feuchte ermittelt werden kann. Im WUFI®-HzP-Ansatz wird diese Verzögerung über den Diffusionswiderstand der Pilzspore abgedeckt, welcher Befeuchtung und Trocknung entsprechend verlangsamt und erst bei Erreichen des spezifisch erforderlichen Wassergehalts in die zweite Phase der Berechnung des Masseabbaus wechselt. Während beim Schimmelmodell ein Wachstum des Pilzmyzels in mm prognostiziert wird, erfolgt im HzP-Modell eine Prognose des Masseabbaus in Prozent der vorhandenen Masse. Um eine Übereinstimmung mit den gemessenen Masseverlusten aus den aktuellen Versuchen zu erreichen, ist eine geeignete Umrechnung erforderlich.

Die Umrechnung wird mit einem Faktor von 35 mm/1 M.-% so ermittelt, dass sie die Masseverluste aus dem kritischsten der 6 Klimata für das kritischste Material (Kiefer-Splintholz bei

15 °C und 100 % r.F.) auf der sicheren Seite abdeckt. Dies erscheint sinnvoll, da Masseverluste in der Praxis i.d.R. absolut vermieden werden sollten und dieser Faktor trotzdem noch ein geringeres Wachstum ergibt als der Ansatz aus [17]. Für alle anderen Materialien außer der Nassverfahrensplatte und die anderen Klimate bleibt die Prognose noch weiter auf der sicheren Seite. Für die Nassverfahrensplatte wird bei gleichem Umrechnungsfaktor die entsprechend niedriger liegende Grenzkurve ThermNat I verwendet. Sie deckt die anfänglichen Masseverluste bei 15 °C und 100 % r.F. noch auf der sicheren Seite ab, liegt bei den späteren Werten aber etwas niedriger als die Messung. Dies erscheint vertretbar, da zum einen größere Masseverluste sowieso nicht toleriert werden können – die Auswertung im Bereich größerer Masseverluste also nur eine geringe praktische Relevanz aufweist – und zum anderen der Masseabbau bei geringeren Feuchten zu hoch ausfällt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der in [26] angelegte, und im aktuellen Modell verifizierte und weiterentwickelte Modellansatz gegenüber den Messergebnissen jeweils noch deutlich auf der sicheren Seite liegt, aber dennoch ebenso deutlich die Anwendungsgrenzen der Materialien gegenüber den bisher verfügbaren Bewertungskriterien nach oben verschiebt. Mit dem neuen Ansatz müssen nun weitere Erfahrungen im Vergleich zu Labor- und Praxisuntersuchungen gesammelt und dieser ggf. an der einen oder anderen Stelle noch weiter verfeinert werden. Weitere Untersuchungen erscheinen v.a. für die unteren Grenzkurven der besonders beständigen Materialien sinnvoll, die teilweise einen signifikant niedrigeren Masseverlust aufweisen als Massivholz - aber auch bezüglich der Geschwindigkeit des Masseabbaus im Feuchtebereich um die 97 % r.F., bei der die Prognose aktuell noch recht weit auf der sicheren Seite liegt.

3.2.4 Abgleich der Modelle mit den Versuchsergebnissen

Mit den festgelegten Grenzkurven ThermNat I und ThermNat II und den zuvor beschriebenen Wachstumsparametern werden nun die Holzabbauprozesse unter den untersuchten Klimabedingungen nachberechnet und mit den Versuchsergebnissen verglichen.

Abbildung 34 zeigt die Vergleiche der Prognose mit den Messergebnissen. Die Nassverfahrensplatte ohne Hydrophobierung wurde entsprechend der Messergebnisse der Klasse ThermNat I (weniger beständig als Holz) zugeordnet. Die Punkte stellen die einzelnen Messergebnisse und die durchgezogene Linie die Mittelwerte der jeweils drei Probekörper dar. Die hellblaue gestrichelte Linie entspricht dem prognostizierten Masseverlust aus dem Prognosemodell. Der Vergleich zeigt, dass vor allem bei den niedrigeren Temperaturen und Feuchten der Masseverlust früher beginnt und deutlich stärker ansteigt als in der Messung. Bei den höheren Temperaturen von 25 und 30 °C bei 97 % wird der Start des Masseverlusts gut abgedeckt, der anschließende Anstieg liegt ebenfalls deutlich höher als die Messdaten.

Die anderen Naturfaserdämmstoffe sowie das Referenzholz (Kiefer-Splintholz) werden mit der Grenzkurve „ThermNat II“ berechnet (gestrichelte rote Linie). Der Masseverlust beginnt bei

den verschiedenen Klimabedingungen nach etwa 1-2 Monaten - bei den niedrigen Temperaturen etwas früher, bei den höheren in etwa so wie gemessen. Der prognostizierte Masseverlust liegt wie bereits erwähnt, bei den höheren Feuchten von 100 % nur leicht, bei den niedrigeren von 97 % dagegen weiter auf der sicheren Seite.

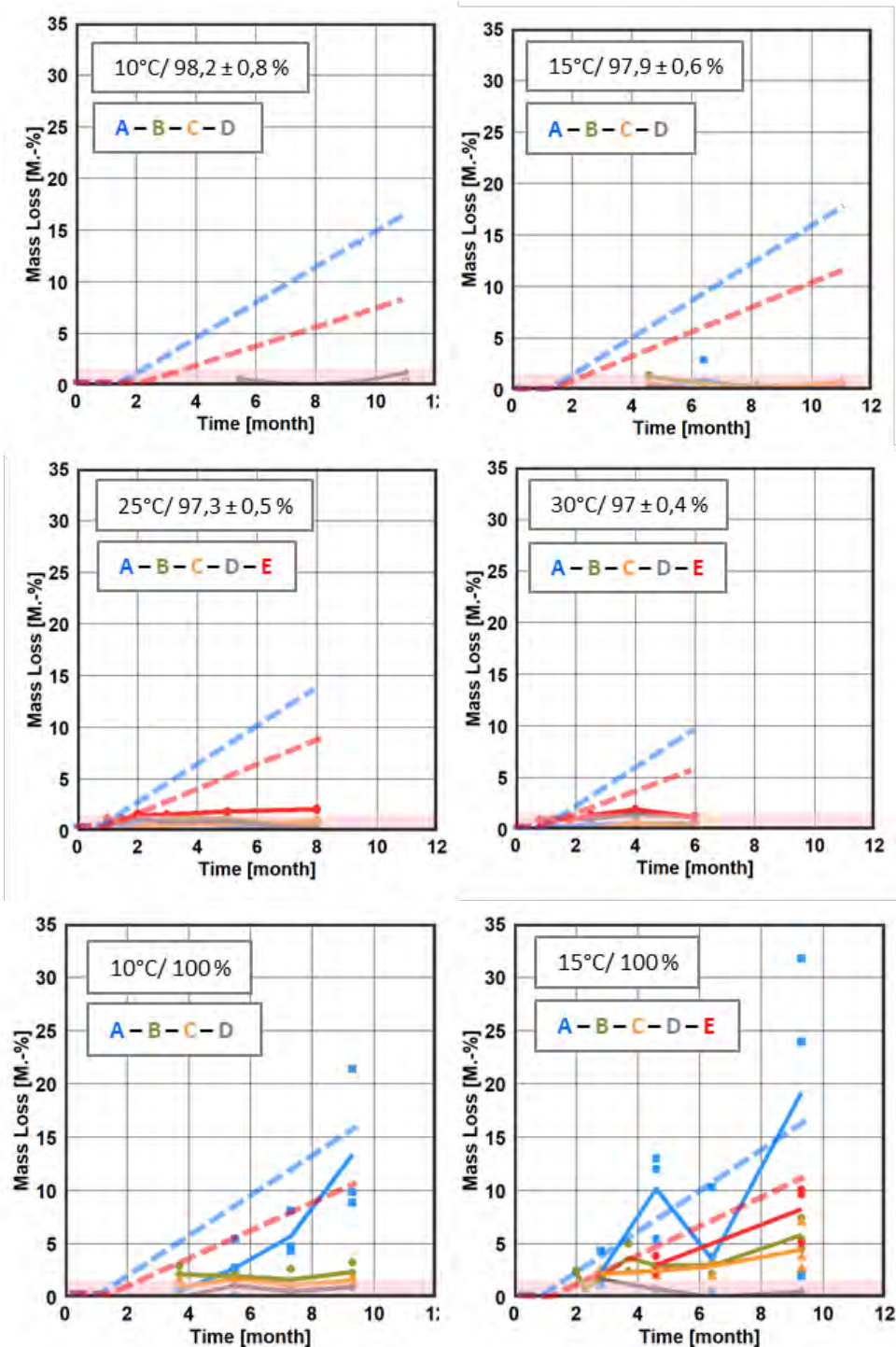
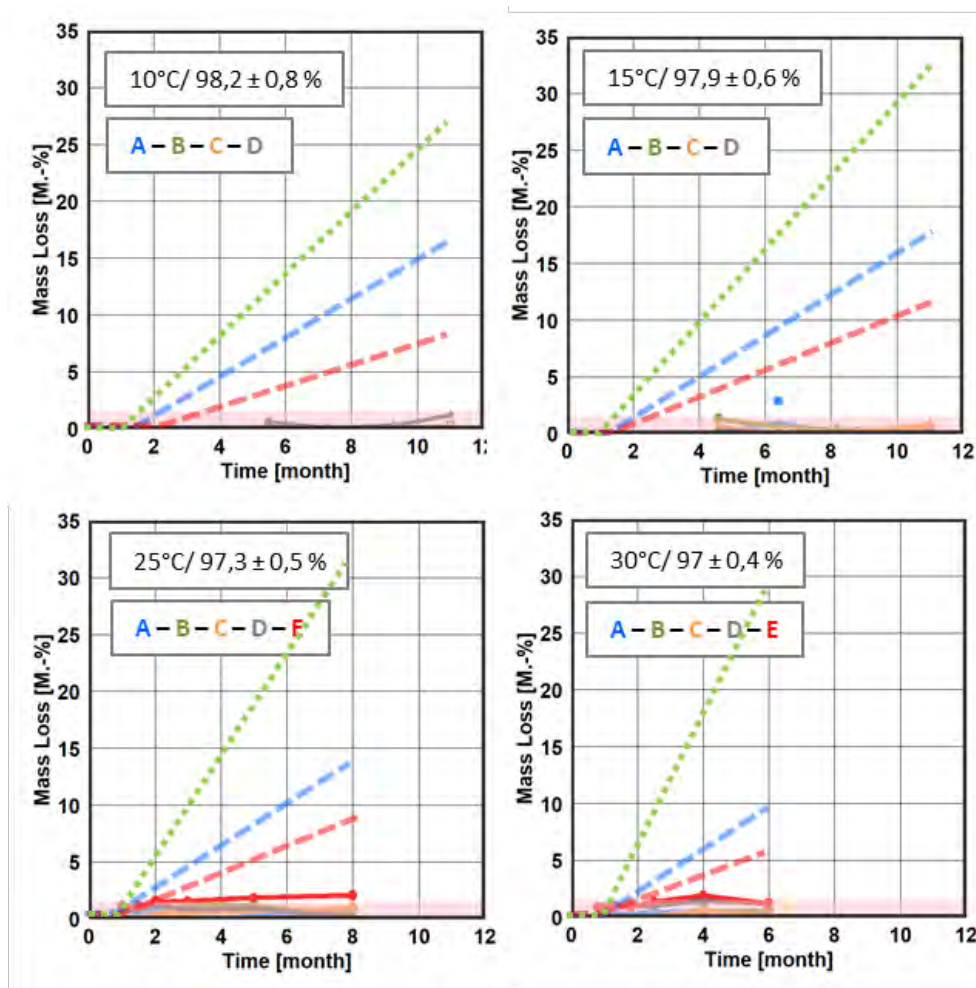


Abbildung 34: Vergleich zwischen Prognose (blau für ThermNat I und rot gestrichelt für ThermNat II) und Messung (Punkte und Mittelwertkurven) der Masseverluste der verschiedenen Naturfaserdämmstoffe und des Referenzholzes (A = Nassverfahren; B = Trockenverfahren ohne Hydrophobierung; C = Trockenverfahren mit Hydrophobierung; D = Zellulose; E =

Kiefer-Splintholz), transparent rot markiert = Bereich der Messungenauigkeit von 1,5 M.-%)

In Abbildung 35 wird die Prognose mit den zwei neu ermittelten Grenzkurven mit dem Prognosemodell von Viitanen [17] verglichen. Dieses Modell kann für Massivholz herangezogen werden, sollte nach eigener Aussage aber nur für die Bewertung bis zum Start des Abbauprozesses aber allenfalls eingeschränkt für die Prognose des weiteren Masseabbaus eingesetzt werden. Das mathematisch-empirische Viitanen-Modell berücksichtigt ebenfalls auf Basis von Laborversuchen die Faktoren Zeit, Temperatur und relative Feuchte. In den umfangreichen Laboruntersuchungen im Rahmen seiner Dissertation wurde als kritischer Pilz *Coniophora puteana* auf schwedischem Kiefer-Splintholz untersucht [32]. Die prognostizierten Masseverluste anhand dieses Modells sind dabei gegenüber der Darstellung aus Abbildung 35 als hellgrüne Linien ergänzt. Die Abbaurate nach Viitanen liegt dabei in allen Fällen deutlich höher als die durch die neuen Ansätze prognostizierten Masseverluste. Wie bereits erwähnt, dürfte der schnellere Masseverlust bei Viitanen v.a. durch das Einbringen von mehr Pilzmasse im Verhältnis zur Probekörpermasse begründet sein (siehe Kapitel 3.1.2).



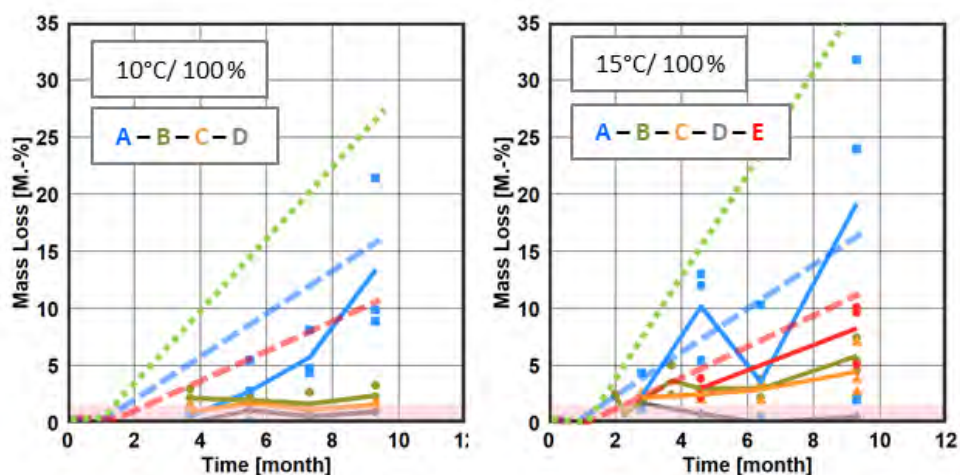


Abbildung 35: Vergleich zwischen Prognose nach dem neuen Modell (blau und rot gestrichelt), Prognose nach Viitanen (grün gestrichelt) und Messung (Punkte und Mittelwertkurven) der Masseverluste der verschiedenen Naturfaserdämmstoffe und des Referenzholzes (A = Nassverfahren; B = Trockenverfahren ohne Hydrophobierung; C = Trockenverfahren mit Hydrophobierung; D = Zellulose; E = Kiefer-Splintholz transparent; rot markiert = Bereich der Messungenauigkeit von 1,5 M.-%)

Die neuen Untersuchungsergebnisse belegen anhand der Referenzholzproben, dass das Modell von Viitanen prinzipiell gut geeignet und gegenüber den real zu erwartenden Fäulnisfortschritten immer noch deutlich auf der sicheren Seite ist. Es ist eher von einem geringeren Wachstum auszugehen, wie es durch die rot gestrichelte Linie repräsentiert wird. Sogar Naturfaserdämmstoffe mit geringerer Beständigkeit als Holz zeigen noch niedrigere Masseverluste als das Modell nach Viitanen sie für Holz prognostizieren würde. Genau wie der neue Ansatz liegt die Prognose von Viitanen im niedrigeren Feuchtebereich gegenüber den Messdaten weiter auf der sicheren Seite als bei den höheren Feuchten.

Beim neuen Ansatz war diese Diskrepanz bei den weniger beständigen Materialien entsprechend ThermNat I aufgrund der Systematik des Modells zu erwarten. Um hier eine feinere Differenzierung für das eher untypische Materialverhalten zu ermöglichen, wären entsprechend umfangreichere Untersuchungen erforderlich, da sich das Material aber bei den höheren Feuchten als besonders empfindlich gegenüber Masseverlusten durch Pilzbefall erweist, erscheint es trotzdem sinnvoll, hier aktuell noch vorsichtig zu bleiben.

Generell stellt sich die Frage, ob für einzelne Materialien bei abweichendem Verhalten tatsächlich individuelle Kurven ermittelt werden sollten. Wenn man davon ausgeht, dass ein Material entweder immer empfindlicher oder immer unempfindlicher ist als ein anderes, ergeben sich zwar in Einzelfällen „unnötige“ Sicherheiten; diese könnten aber ggf. zugunsten des einfachen Ansatzes toleriert werden und würden den Prüfaufwand bei zusätzlicher Sicherheit geringhalten. Und auch dieser Ansatz liegt immer noch etwas günstiger als die Prognose gem. Viitanen [32] für das Referenzholz.

3.3 Evaluierung anhand der Freilandversuchsaufzeichnungen

Im folgenden Abschnitt werden die entsprechend Kapitel 2 in den Freilanduntersuchungen aufgezeichneten Klimadaten (Temperatur, Luftfeuchte) mit den in Kapitel 3.2 vorgeschlagenen klimatischen Grenzkurven abgeglichen. Bei den dargestellten Temperatur-/Luftfeuchtekombinationen an der Außenseite des Gefachs (Messposition „a“) handelt es sich um die gemäß Kapitel 2.3.2.1 korrigierten Werte.

3.3.1 Klimatische Bedingungen im Bauteilgefach

In Abbildung 36 sind die Temperatur-/Luftfeuchtekombinationen an der Außenseite des Gefachs (Messposition a) ausgewählter nordseitiger Aufbauten im Tagesmittel dargestellt. Bei den Varianten mit Holzfaser- und Zellulosegefachdämmung (N 1.2/N 2.2 und N 1.3/N 2.3) kommt es im betrachteten Messzeitraum zu keiner längerfristigen Überschreitung der für diese Dämmstoffe relevanten Grenzkurve (ThermNat II). Lediglich bei der Kombination zwischen Zellulosegefachdämmung und EPS WDVS (N 1.3) kommt es zu einer kurzzeitigen (1 Tag) Überschreitung, die als unbedenklich einzustufen ist. Bei den EPS-Varianten ist außenseitig eine MDF-Beplankung zwischen Gefach und WDVS aufgebracht (vgl. Abbildung 7). Da es derzeit noch keine alternative Beurteilungsmethode für derartige Plattenwerkstoffe gibt, würde hier der statische Grenzwert für Holzwerkstoffe von 18 M.-% zum Tragen kommen, was bei der hier eingesetzten MDF einer relativen Porenluftfeuchte von etwa 90 % entsprechen würde. Bei Variante N 1.3 liegen viele Tagesmittelwerte der Luftfeuchte im Gefach zu Beginn der Messung deutlich oberhalb von 90 % r.F. Eine Überschreitung des Grenzwertes von 18 M.-% in der MDF Beplankung ist demnach nicht auszuschließen.

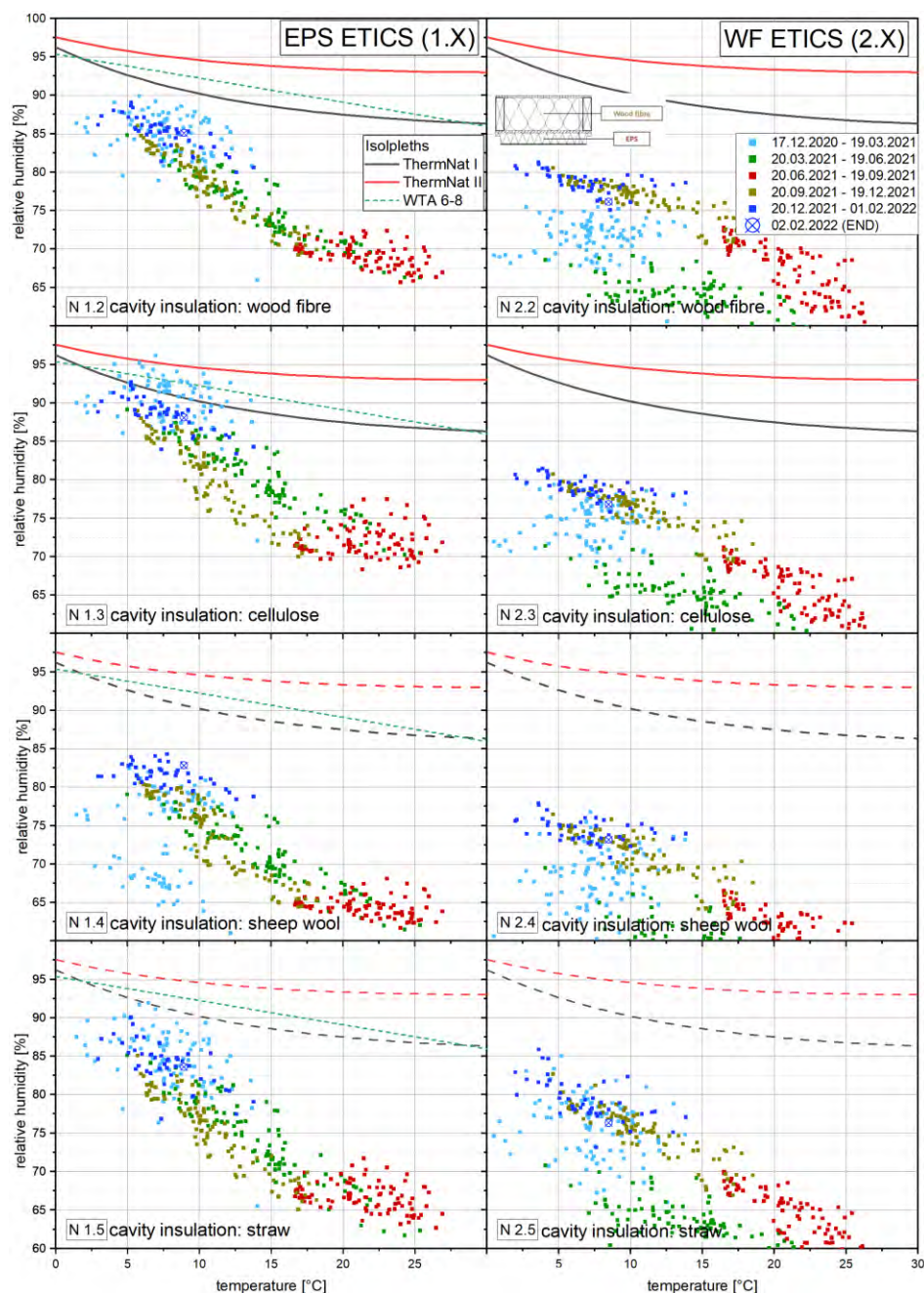


Abbildung 36: Temperatur-/Luftfeuchtekombinationen (24h-Mittel der Messwerte) an der Gefachaußenseite (Messposition „a“) von ausgewählten Aufbauvarianten der Nordfassade inkl. der vorgeschlagenen Grenzkurven ThermNat I und ThermNat II (für Schafwolle- und Stroh zur Orientierung ebenfalls gestrichelt angedeutet).

Bei den Schafwolle- und Strohvarianten (N 1.4/N 2.4 und N 1.5/N 2.5) kommt es ebenfalls in keinem Fall zu einer nennenswerten Überschreitung der vorgeschlagenen Grenzkurven. Hier ist jedoch zu beachten, dass diese lediglich für Holz- und Zellulosefaserdämmstoffe gelten. Aus Gründen der Vergleichbarkeit des Luftfeuchteniveaus sind die Kurven dennoch einge-

zeichnet. Wie bei den Holzplattenwerkstoffen (s.o.) sind auch für Schafwolle und Stroh in Zukunft entsprechende Dauerhaftigkeitsuntersuchungen sinnvoll, um den Planern eine größere Planungssicherheit gewährleisten zu können.

In Abbildung 37 sind die Tagesmittelwerte der gleichen Versuchsvarianten auf der gegenüberliegenden Südfassade dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in allen Fällen höhere Temperaturen bei geringerer relativer Luftfeuchte vorliegt was auf die im Vergleich zur Nordfassade deutlich erhöhte Sonneneinstrahlung zurückzuführen ist. Diese bewirkt eine erhöhte Temperatur an der Putzoberfläche, was in den vorliegenden Messungen zu kurzzeitigen Temperaturspitzen von 67,5 °C (dunkler Putz) und 44 °C (heller Putz) führte. Insgesamt verhalten sich die Varianten auf der Südseite nochmals unkritischer als die jeweils baugleiche Variante auf der Nordseite. Alle Tagesmittelwerte liegen Großteils weit unterhalb der vorgeschlagenen Grenzkurven, sowie der WTA Bemessungsgrenze.

Sowohl aus Abbildung 36 als auch Abbildung 37 geht hervor, dass sich bei den Varianten mit außenseitigem Holzfaser-WDVS (WF WDVS) ein deutlich geringeres Luftfeuchteniveau einstellt als bei der jeweiligen EPS-Vergleichsvariante. Hier zeigt sich erneut, dass die hohe Wasserdampfdurchlässigkeit bzw. der geringe s_d -Wert des WF-WDVS ein deutlich reduziertes Luftfeuchteniveau im Aufbau bewirkt. Im Hinblick auf Abbildung 38 bestätigt sich diese Aussage ebenfalls. Hier sind zusätzlich die auf Basis der Produktdatenblätter errechneten äußeren s_d -Werte der dargestellten Varianten mit Holzfaser als Gefachdämmstoff angegeben. Diese liegen je nach Variante bei 6 m (N 1.8 - OSB + EPS WDVS), 3 m (N 1.2 - MDF + EPS WDVS) und 0,3 m (N 2.2 - WF WDVS). Beim nordseitigen Aufbau mit EPS WDVS und OSB Außenbeplankung liegen die Tagesmittelwerte nochmals deutlich höher als bei der Vergleichsvariante mit MDF Außenbeplankung. Wie auch beim MDF (s.o.) gibt es bisher auch für OSB keine werkstoffspezifischen Isoplethenmodelle. Deshalb käme auch hier die Bemessungsgrenze nach WTA 6-8 [7] oder der statische Materialfeuchte Grenzwert von 18 M.-% (entspricht auch für OSB etwa 90 % Porenluftfeuchte) zum Tragen. Da viele Tagesmittelwerte oberhalb dieser Grenzen liegen, würde der Aufbau im Bemessungsfall als untauglich deklariert werden. In der Vergleichsvariante mit Holzfaser-WDVS (N 2.2) liegen die Tagesmittelwerte wie bereits in Bezug auf Abbildung 36 beschrieben weit unterhalb der in Kapitel 3.2 hergeleiteten Grenzkurven für Holzfaser und Zellulosedämmstoffe (ThermNat I und ThermNat II).

Allgemein ist die erhöhte Diffusionsoffenheit von Holzfaserbasierten WDVS Systemen zum einen für die Langlebigkeit der Materialien von großem Vorteil, da das Wachstum holzerstörender Pilze aufgrund des stark reduzierten Luftfeuchteniveaus im Aufbau weitaus unwahrscheinlicher wird. Zum anderen ist dadurch bei sorptionsfähigen Dämmstoffen mit feuchteabhängiger Wärmeleitfähigkeit auch eine höhere Wärmeschutzperformance zu erwarten, da deren Wärmeleitfähigkeit zu einem gewissen Teil von der Luftfeuchte abhängt und bei niedrigen Luftfeuchten entsprechend geringer ist (mehr dazu siehe Kapitel 4).

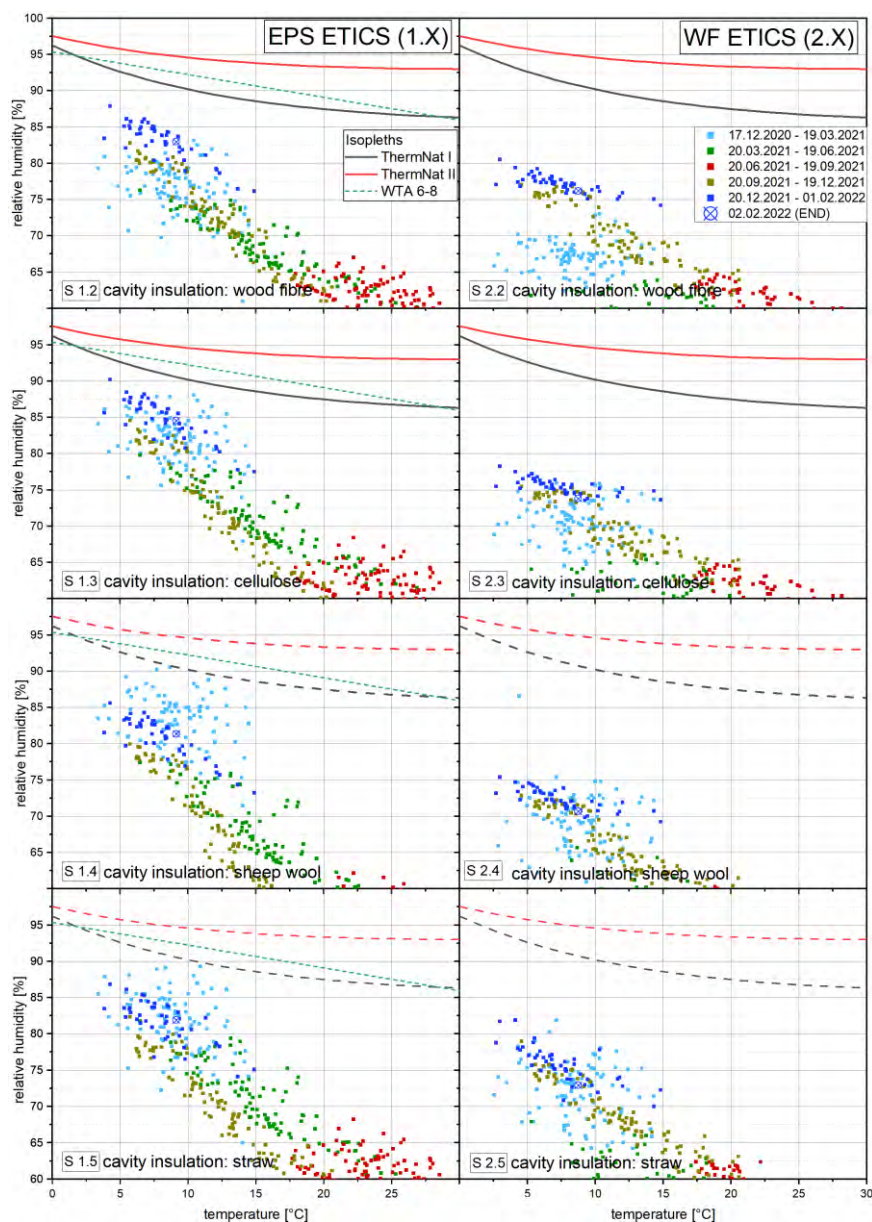


Abbildung 37: Temperatur-/Luftfeuchtekombinationen (24h-Mittel der Messwerte) an der Gefachaußenseite (Messposition a) von ausgewählten Aufbauvarianten der Südfassade inkl. der vorgeschlagenen Grenzkurven ThermNat I und ThermNat II (für Schafwolle- und Stroh zur Orientierung ebenfalls gestrichelt angedeutet).

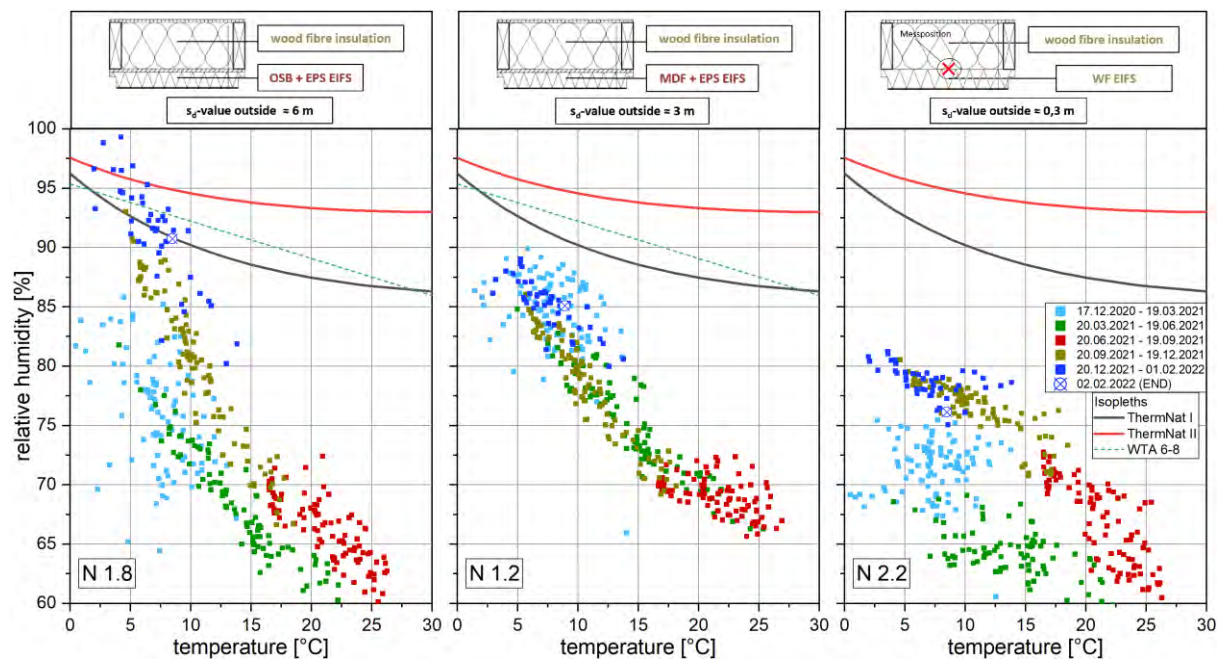


Abbildung 38: Temperatur-/Luftfeuchtekombinationen (24h-Mittel der Messwerte) an der Gefachaußenseite (Messposition „a“) von Aufbauten mit Holzfaservlies Gefachdämmung und unterschiedlichen außenseitigen Beplankungen/Fassadensystemen mit variierendem s_d -Wert.

3.3.2 Klimatische Bedingungen am Holzfaser-WDVS

3.3.2.1 Hydrophobierte Holzweichfaserplatte aus dem Trockenverfahren

In Abbildung 39 sind die Temperatur-/Luftfeuchtekombinationen im Tagesmittel am Holzfaser-WDVS unterhalb der Putzschicht (Messposition P) der Nordfassade aufgetragen. Es ist direkt ersichtlich, dass sowohl unterhalb des hellen (HBW ca. 79), als auch des dunklen (HBW ca. 17) Putzes die Grenzkurven zwischen dem 17.12.2020 und dem 19.03.2021 an vielen Tagen im Mittel überschritten werden. Der Putzauftrag erfolgte Mitte November 2020. Zu dieser Zeit waren die Tagesdurchschnittstemperatur sowie die Globalstrahlungssumme bereits auf spätherbstlichem Niveau. Die Trocknung des Putzes zog sich daher über einen längeren Zeitraum, in welchem die Luftfeuchte am Holzfaser-WDVS unterhalb beider Putzfarbvarianten entsprechend erhöht war. Es ist zu erkennen, dass bei den dunklen Putzvarianten die Luftfeuchtigkeit im Frühjahr (grüne Punkte) weitaus schneller absinkt als bei den hellen Varianten und im Sommer 2021 auf ein Niveau von unter 60 % r.F. abfällt. Die Austrocknung der Putzschicht scheint demnach hier offenbar deutlich schneller zu verlaufen. Bei den hellen Putzvarianten bleibt die r.F. im Sommer 2021 aufgrund des langsameren Austrocknungsverhaltens auf einem Niveau zwischen 65 % und 70 %. Im darauffolgenden Winter (20.12.2021 – 01.02.2022) steigen die Tagesmittelwerte wieder auf ein Niveau von über 90 % r.F., wobei unterhalb der hellen Putzvarianten das Niveau geringfügig höher liegt als bei den dunklen. Bei beiden Varianten werden die vorgeschlagenen Grenzkurven in dieser Zeit im Tagesmittel nicht mehr überschritten.

Die instationäre Prognose des zu erwartenden Materialabbaus unter Annahme der in Abbildung 39 dargestellten Klimaverhältnisse geht aus Abbildung 40 und Abbildung 41 hervor.

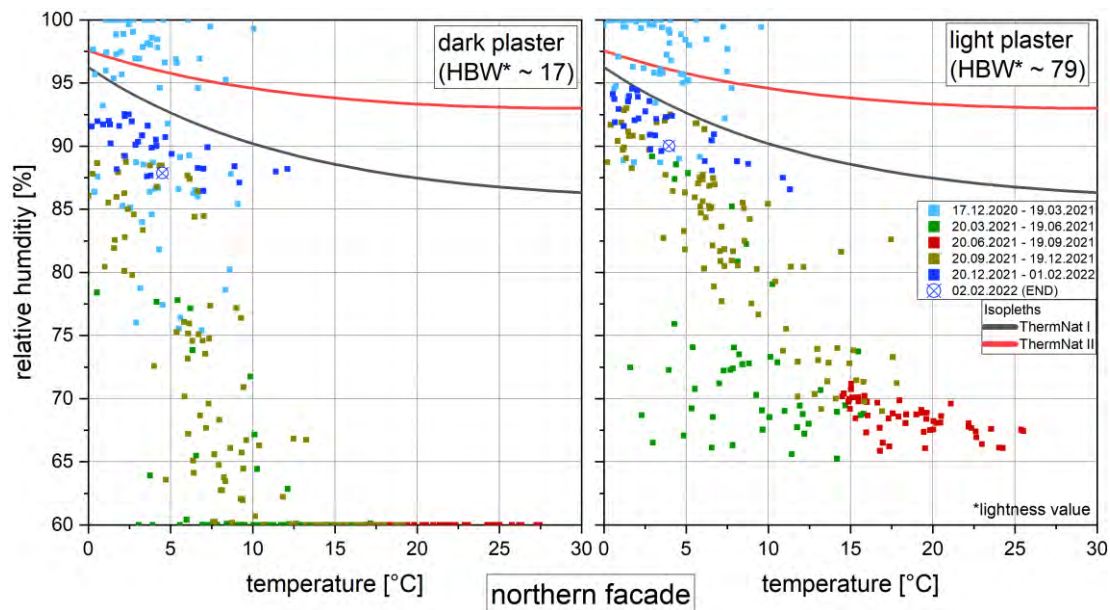


Abbildung 39: Temperatur-/Luftfeuchtekombinationen (24h-Mittel der Messwerte) am hydrophobierten Holzfaser-WDVS aus dem Trockenverfahren (Dichte lt. Datenblatt: 140 kg/m^3) unterhalb der Putzschicht (Messposition „P“) für die Varianten mit dunkler (links) und heller (rechts) Putzfarbe auf der Nordfassade. Dargestellt sind die arithmetischen Mittelwerte der Messungen über die Varianten N 2.6 und N 2.7 (links) und die Varianten N 2.1 bis N 2.5 (rechts).

Die hier jeweils als Stundenwerte betrachteten Temperatur- und Luftfeuchteverläufe bestätigen die oben beschriebenen Ausführungen zum Trocknungs- und Befeuchtungsverhalten der beiden unterschiedlichen Farbvarianten. In dieser Darstellung ist nochmals besser zu erkennen, dass die Luftfeuchtigkeit nach Beginn der Messung am 07.12.2020 unterhalb der hellen Putzvarianten sichtbar länger auf einem Niveau $> 90 \%$ verharrt ($> 2000 \text{ h}$). Bei den dunklen Putzvarianten ist bereits ab ca. 1000 h nach Messbeginn eine stetige Abnahme der relativen Luftfeuchte festzustellen.

In beiden Fällen ist eine Überschreitung des aus der Temperatur abgeleiteten Grenzwassergehalts nach etwa 800 h erkennbar (Isoplethe: ThermNat II). Bei hellem Putz ist diese höher und dauert über einen längeren Zeitraum an als bei der dunklen Variante. Ab etwa 1000 h prognostiziert das Modell jeweils ein beginnendes Myzelwachstum, welches beim hellen Putz entsprechend steiler ansteigt und länger anhält als beim dunklen Putz, bei dem der Sporenwassergehalt aufgrund des ausgeprägteren Trocknungsverhaltens bereits um einiges früher wieder absinkt.

Im darauffolgenden Herbst/Winter (ab ca. 7000 h) verweilt der Sporenwassergehalt durchgehend weit unterhalb des Grenzwassergehalts. Das Prognosemodell beschreibt dementsprechend kein weiteres Wachstum. Die prognostizierte Summe des Myzelwachstums beträgt ca.

35 mm (weißer Putz) und ca. 13 mm (dunkler Putz). Dabei ist zu beachten, dass das prognostizierte Myzelwachstum in [mm] aktuell in Analogie zu WUFI® Bio nur ein Bewertungsindikator ist, der beschreibt, ob Holzabbau überhaupt stattfinden kann (Myzelwachstum > 0 mm), sowie zum qualitativen Vergleich zwischen verschiedenen starkem Holzabbau dient.

Wie im Kapitel 3.2.2 beschrieben, wird der prognostizierte Materialabbau entsprechend dem Entwicklungsstand des Modells zum Zeitpunkt der Auswertung über den Faktor 1 M.-% / 35 mm aus dem „Myzelwachstum“ umgerechnet. Die genaue Umsetzung im Modell kann von diesem vorläufigen Stand noch etwas abweichen. Damit wäre, auf der sicheren Seite liegend, auf Basis der Prognose maximal 1 M.-% Materialverlust zu erwarten.

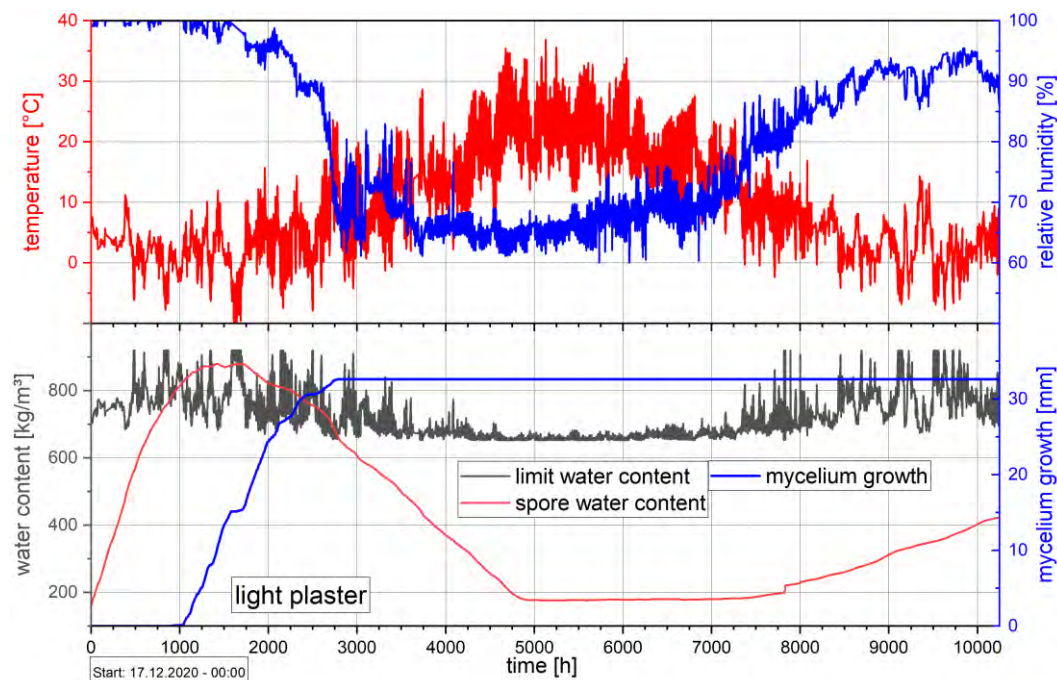


Abbildung 40: Temperatur und relative Luftfeuchte am hydrophobierten Holzfaser-WDVS (Messwerte) aus dem Trockenverfahren (Dichte lt. Datenblatt: 140 kg/m³) unterhalb des hellen Putzes über den gesamten Messzeitraum (oben). Parallel dazu: Aus Temperatur abgeleiteter Grenzwassergehalt (Isoplethenmodell: ThermNat II), Entwicklung des instationär hergeleiteten Sporenwassergehalts und resultierendes Sporenwachstum (unten).

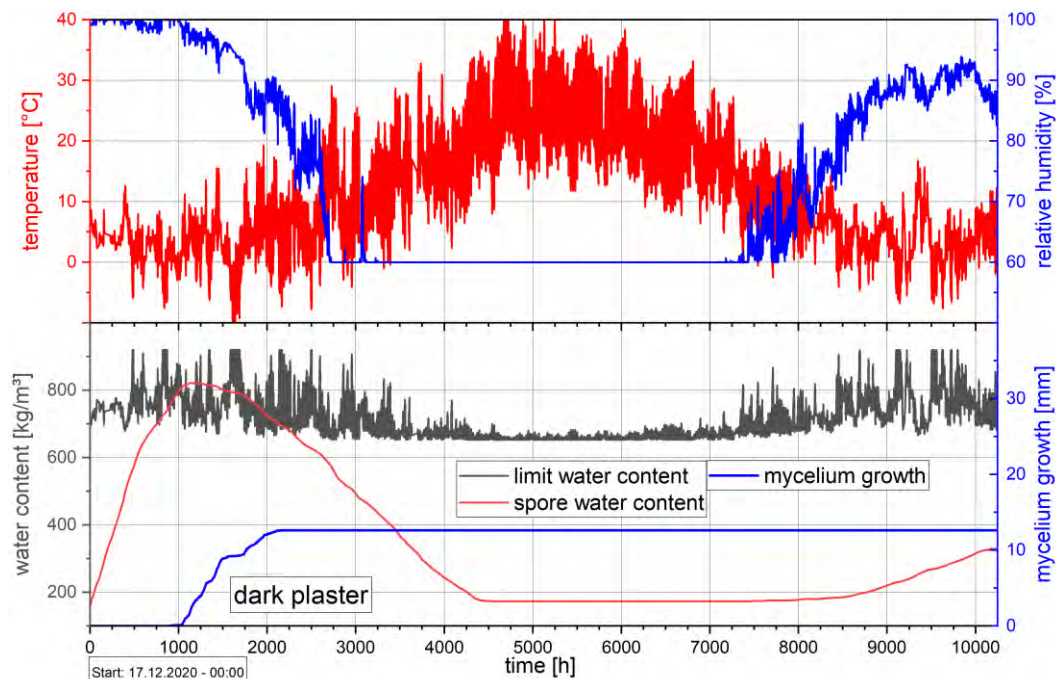


Abbildung 41: Temperatur und relative Luftfeuchte am hydrophobierten Holzfaser-WDVS (Messwerte) aus dem Trockenverfahren (Dichte lt. Datenblatt: 140 kg/m^3) unterhalb des dunklen Putzes über den gesamten Messzeitraum (oben). Parallel dazu: Aus Temperatur abgeleiteter Grenzwassergehalt (Isoplethenmodell: ThermNat II), Entwicklung des instationär hergeleiteten Sporenwassergehalts und resultierendes Sporenwachstum (unten).

Bei Abbildung 42 bis Abbildung 45 handelt es sich um Fotos geöffneter Messstellen an der Nordfassade von jeweils einer hellen und einer dunklen Putzvariante (Messposition P) nach Ablauf des Messzeitraums. Insgesamt wurden fünf Messstellen mit weißem Putz und zwei Messstellen mit dunklem Putz geöffnet und auf optisch erkennbares Myzel überprüft. Die Fotos stehen repräsentativ für alle geöffneten Varianten: Optisch war in keinem Fall ein Myzelwachstum ersichtlich.



Abbildung 42: Geöffnete Messposition P an der Variante N 2.3 (heller Putz) nach dem Messzeitraum. Optisch ist kein Pilzmyzel erkennbar.



Abbildung 43: Entfernte Putzschicht der Variante N 2.3 (heller Putz) mit Balsasensor- und Holzfaserrückständen. Optisch ist kein Pilzmyzel erkennbar.



Abbildung 44: Geöffnete Messposition P an der Variante N 2.6 (dunkler Putz) nach dem Messzeitraum. Optisch ist kein Pilzmyzel erkennbar.

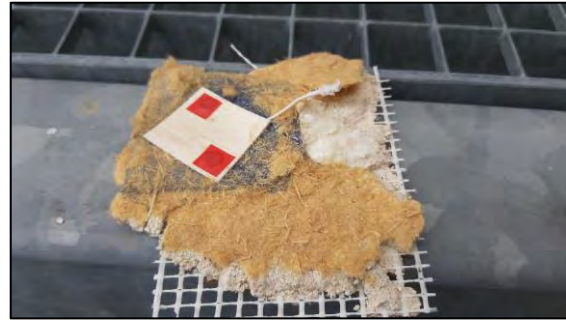


Abbildung 45: Entfernte Putzschicht der Variante N 2.6 (dunkler Putz) mit Balsasensor- und Holzfaserrückständen. Optisch ist kein Pilzmyzel erkennbar.

Das auf Basis der klimatischen Aufzeichnungen vom Prognosemodell auf der sicheren Seite prognostizierte Myzelwachstum hat in der Realität also offenbar nicht oder noch nicht stattgefunden bzw. ist mit bloßem Auge nicht erkennbar. Dies ist nicht überraschend und hat unter anderem folgende Gründe:

- frisch aufgebrachte Putzsysteme führen zu erhöhten pH-Werten auf dem Holzfaser-WDVS → zu Beginn hemmend für holzerstörende Pilze
- reduzierte Sauerstoffverfügbarkeit unterhalb der Putzschicht im eher dichten Material
- die Messwerte sind punktuell → nur wenige mm tiefer in der WDVS Substanz könnte das Niveau der relativen Feuchte schon geringer ausfallen. Versuchsbedingt sind die Verhältnisse im Labor und damit auch im Prognosemodell tendenziell auf mittlere Feuchten in etwas dickeren Schichten (~ 5-10 mm) bezogen.
- das Prognosemodell beinhaltet gewisse Sicherheiten, die durch die Unschärfen der Laborversuche bedingt, aber natürlich auch beabsichtigt sind, da es langfristig als Werkzeug für die Bauteilbemessung herangezogen werden soll.

Abbildung 46 zeigt die Temperatur-/Luftfeuchtekombinationen unterhalb des hellen und dunklen Putzes auf der Südfassade. Die Unterschiede zwischen den beiden Farbvarianten sind erwartungsgemäß aufgrund der weitaus höheren südseitigen Direktstrahlung deutlicher ausgeprägt als auf der Nordfassade. Bei der dunklen Variante liegen lediglich wenige Tagesmittelwerte zu Beginn (17.12.2020 – 19.03.2021) oberhalb der relevanten Grenzlinie (ThermNat II). Bereits im Frühjahr (grüne Punkte) fällt das Luftfeuchteniveau hier unter 60 % r.F, während unterhalb des hellen Putzes auch in der Sommerperiode (rote Punkte) das Feuchteniveau noch an vielen Tagen oberhalb von 60% r.F. liegt. In beiden Fällen zeigt sich das Austrocknungsverhalten des Putzes aufgrund der vorteilhafteren Strahlungsbilanz und den daraus resultierenden erhöhten Oberflächentemperaturen merkbar schneller als auf der Nordseite.

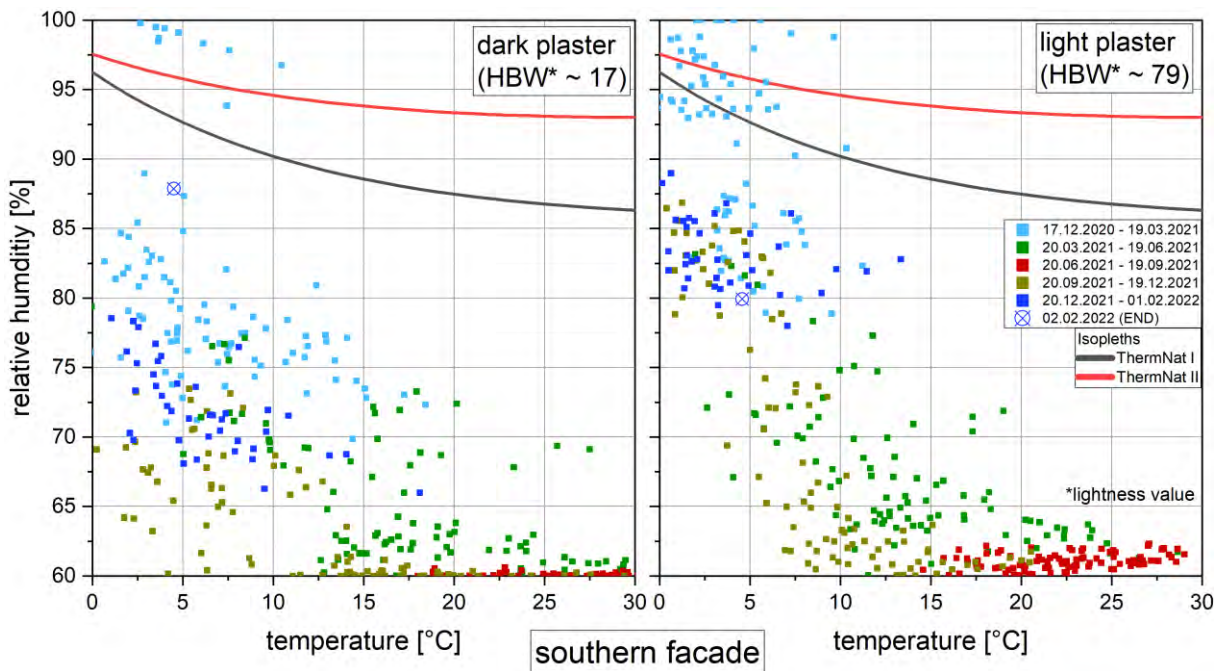


Abbildung 46: Temperatur-/Luftfeuchtekombinationen (24h-Mittel der Messwerte) am WDVS aus hydrophobierter Holzfaser aus dem Trockenverfahren (Dichte lt. Datenblatt: 140 kg/m^3) unterhalb der Putzschicht (Messposition P) für die Varianten mit dunkler (links) und heller (rechts) Putzfarbe auf der Nordfassade. Dargestellt sind die Messwerte der Variante S 2.6 (links) und die arithmetischen Mittelwerte über die Varianten S 2.1 bis N 2.5 (rechts)

3.3.2.2 Holzweichfaserplatte aus dem Nassverfahren (ohne Hydrophobierung)

Die Tagesmittelwerte der Temperatur-/Luftfeuchtekombinationen am nicht hydrophobierten Holzfaser-WDVS aus dem Nassverfahren (N 2.8 –Nordseite, helle Putzvariante) sind in Abbildung 47 aufgetragen. Im Hinblick auf die Luftfeuchte fällt auf, dass die Tagesmittelwerte sich stark von jenen unterscheiden, die bei den nordseitigen, hydrophobierten Vergleichsvarianten aus dem Trockenverfahren beobachtet wurden. Anders als bei diesen, liegt zu Messbeginn (17.12.2020 – 19.03.2021) im Tagesmittel kein Wert an der Taupunktgrenze (100 % r.F.). In diesem Fall wird als Grenzkurve die Isoplethe „ThermNat I“ (schwarze Linie) herangezogen, da im Laborversuch das Holzfaserverfahren empfindlicher als Massivholz war (siehe Kapitel 3.1.2). Allerdings ist nicht auszuschließen, dass sich die Beständigkeit einzelner Produkte auch aus demselben Herstellungsverfahren abhängig von anderen Faktoren wie Dichte, Rohstoff und ggf. Zusatzstoffen unterscheiden – in [15] war beispielsweise eine Nassverfahrensplatte beständiger als Massivholz. Es ist zu erkennen, dass viele Tagesmittelwerte oberhalb der ThermNat I-Grenze liegen. Über den restlichen Messzeitraum (20.03.2021 – 02.02.2022) ist hier ebenfalls ein niedrigeres Feuchteniveau zu beobachten als bei den Vergleichsvarianten aus dem Trockenverfahren. Im Sommer sinkt die Feuchte für einen längeren Zeitraum unterhalb von 60 % r.F. fällt. In Abbildung 48 sind u.a. die Stundenwerte der relativen Luftfeuchtigkeit an der Messposition P im zeitlichen Verlauf aufgetragen. Hier kann man nochmals besser erkennen, dass die Luftfeuchte zu keinem Zeitpunkt 100 % r.F. erreicht. In der

zweiten Kälteperiode (ab ca. 7000 h) bleibt die r.F. dann durchgehend unterhalb von 90 % r.F. Bestimmte Eigenschaften der nicht hydrophobierten Platte aus dem Nassverfahren bewirken also offenbar ein erkennbar geringeres Luftfeuchteniveau im Vergleich zu den hydrophobierten Platten aus dem Trockenverfahren. Es wird vermutet, dass hier u.a. durch die nicht vorhandene Hydrophobierung Feuchteaufnahme und Weitertransport in der Platte in größerem Umfang erfolgen können. Anfallendes Kondensat während der Putzaustrocknung kann somit besser absorbiert und über einen größeren Querschnitt in der Platte verteilt werden. Die Feuchtespitzen an der Plattenoberfläche könnten dadurch abgepuffert werden.

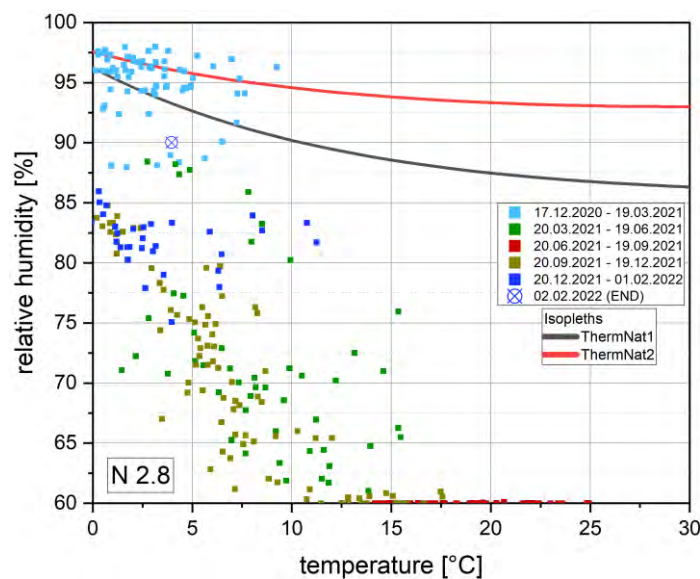


Abbildung 47: Temperatur-/Luftfeuchtekombinationen (24h-Mittel der Messwerte) am WDVS aus nicht hydrophobierter Holzfaser aus dem Nassverfahren (Dichte lt. Datenblatt: 265 kg/m³) unterhalb der Putzschicht (Messposition P). Dargestellt sind die Messwerte der Variante N 2.8 (heller Putz).

In Abbildung 48 unten ist für die Variante N 2.8 der aus dem relevanten Isoplethenmodell (ThermNat I) hervorgehende Grenzwassergehalt, der Sporenwassergehalt, sowie das aus dem Modell prognostizierte Sporenwachstum für die gemessenen Klimabedingungen am WDVS aufgetragen. Da hier „ThermNat I“ das relevante Bewertungsmodell ist, liegt der Grenzwassergehalt - bei dessen Überschreitung ein Myzelwachstum stattfinden kann - auf einem erkennbar geringeren Niveau als bei den Vergleichsvarianten (siehe Abbildung 40). Aufgrund des geringeren Luftfeuchteniveaus steigt die Sporenluftfeuchte nur sehr langsam an und überschreitet nur für einen kurzen relevanten Zeitraum den Grenzwassergehalt (2600 h – 2800 h). Das Modell prognostiziert in diesem Zeitraum ein Myzelwachstum von ca. 1 mm, also ein sehr niedriges Niveau, bei dem Materialabbau im ungünstigsten Fall gerade beginnen könnte. Im darauffolgenden Winter bleibt der Sporenwassergehalt aufgrund des verhältnismäßig geringen Luftfeuchteniveaus weit unterhalb des Grenzwassergehalts. Ein weiteres Myzelwachstum wird vom Modell entsprechend nicht prognostiziert.

Obwohl die betrachtete Holzfasерplatte aus dem Nassverfahren hier mit der Grenzkurve ThermNat I auf Basis der Laborversuche als empfindlicher angenommen und bewertet wurde als

die Materialien aus dem Trockenverfahren (siehe Kapitel 3.1.2), wird dennoch ein weitaus geringeres Myzelwachstum als bei den Vergleichsvarianten aus dem Trockenverfahren prognostiziert. Das liegt vermutlich an der höheren Feuchteaufnahme- und Transportkapazität der Nassverfahrensprodukte ohne Hydrophobierung, die zu mehr Feuchtespeicherung und -umverteilung führt als bei den Trockenverfahrensprodukten und damit schnellen Änderungen der relativen Feuchte entgegenwirkt. Die relative Feuchte bleibt meistens sogar noch unterhalb der niedrigeren Grenzlinie.

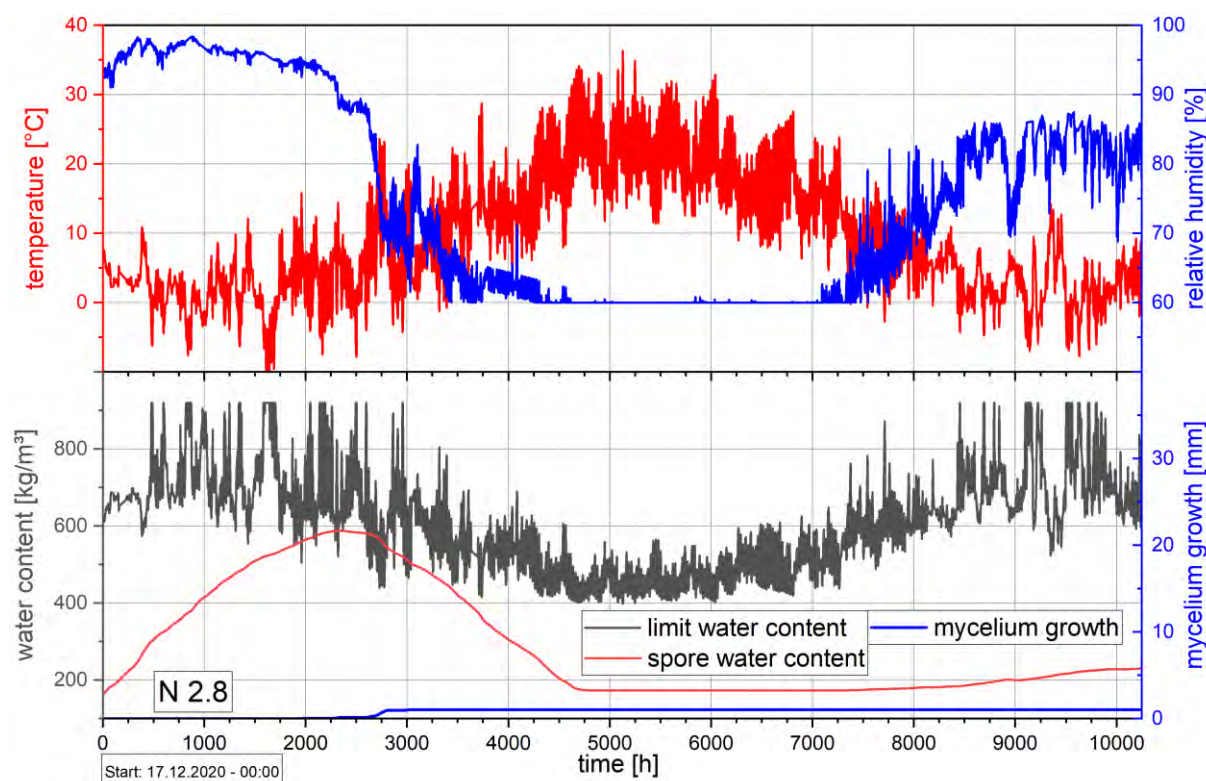


Abbildung 48: Temperatur und relative Luftfeuchte am WDVS (Messwerte) aus nicht hydrophobierten Holzfasern aus dem Nassverfahren (Dichte lt. Datenblatt: 265 kg/m^3) unterhalb des hellen Putzes über den gesamten Messzeitraum (oben). Parallel dazu: Aus Temperatur abgeleiteter Grenzwassergehalt (Isoplethenmodell: ThermNat I), Entwicklung des instationär hergeleiteten Sporenwassergehalts und resultierendes Sporenwachstum (unten).

Auch bei der optischen Kontrolle nach dem Messzeitraum (siehe Abbildung 49 und Abbildung 50) war kein Myzel an der Holzweichfaserplatte zu erkennen.



Abbildung 49: Geöffnete Messposition P an der Variante N 2.8 (heller Putz) nach dem Messzeitraum. Optisch ist kein Pilzmyzel erkennbar.

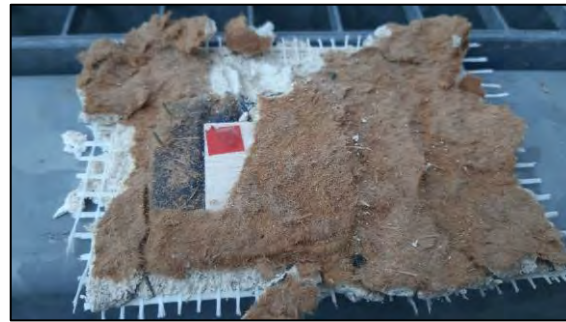


Abbildung 50: Entfernte Putzschicht der Variante N 2.8 (heller Putz) mit Balsasensor- und Holzfaserrückständen. Optisch ist kein Pilzmyzel erkennbar.

3.3.2.3 Holzweichfaser WDVS auf frischem Kalksandsteinmauerwerk

Die Temperatur-/Luftfeuchtekombinationen der Mauerwerksvarianten auf der Westseite (W 1.1 und W 1.2) sind an verschiedenen Positionen im Bauteil im Tagesmittel in Abbildung 51 dargestellt. Die Feuchte im Mauerwerk wurde vor Beginn der Messung mittels Darrverfahren bestimmt und betrug im Auslieferungszustand vom Werk zwischen 4 M.-% und 6 M.-%. Bei einer Dichte von 2000 kg/m^3 entspricht dies 80 l/m^3 – 120 l/m^3 . Die Putzaufbringung erfolgte bei diesen Varianten Anfang März 2021 kurz vor Frühlingsbeginn.

Im Hinblick auf die gemessenen Tagesmittelwerte zeigen sich beide Varianten sehr ähnlich. Bei der stärkeren Mauerwerksvariante (25 cm, W 1.1) liegen die Tagesmittelwerte an beiden Messpositionen auf einem etwas höheren Niveau. In beiden Varianten kommt es zwischen Mauerwerk und WDVS (Messposition m) zu keiner Überschreitung der relevanten Grenzkurve (ThermNat II) im Tagesmittel. Die deutlich erkennbare Abnahme des Feuchteniveaus an diesen Stellen von Frühling bis Herbst 2021 (20.03.2021 – 19.09.2021) ergibt sich aus den Trocknungsvorgängen im Mauerwerk. Der erneute Anstieg der relativen Feuchte ab Herbst ist auf die Erhöhung der Feuchtelast im Forschungshaus ab dem 19.10.2021 (siehe Kapitel 2.3.2) in Kombination mit geringfügig niedrigeren Innenraumtemperaturen zurückzuführen.

An der Putzseite (Messposition P) des WDVS kommt es in beiden Fällen zu einer Überschreitung der relevanten Grenzkurve (ThermNat II) an mehreren Tagen zu Beginn und zum Ende des Messzeitraums. Nach schneller Putzaustrocknung im Frühjahr pendelt sich die Luftfeuchte in den Sommermonaten bei etwa 60 % bis 70 % r.F. ein. Aufgrund der Feuchte im Mauerwerk, ist das Feuchteniveau trotz vorteilhafterer Strahlungsbilanz auf der Westseite im Sommer höher als zur selben Zeit bei den nordseitigen Varianten in Holzrahmenbauweise. Auch im zweiten Winter (dunkelblaue Punkte) kommt es in beiden Varianten im Tagesmittel zu kritischen Luftfeuchten oberhalb der Grenzlinie bis 100 % r.F. Diese sind auf Diffusion der Mauerwerksfeuchte zur Außenseite des Bauteils zurückzuführen.

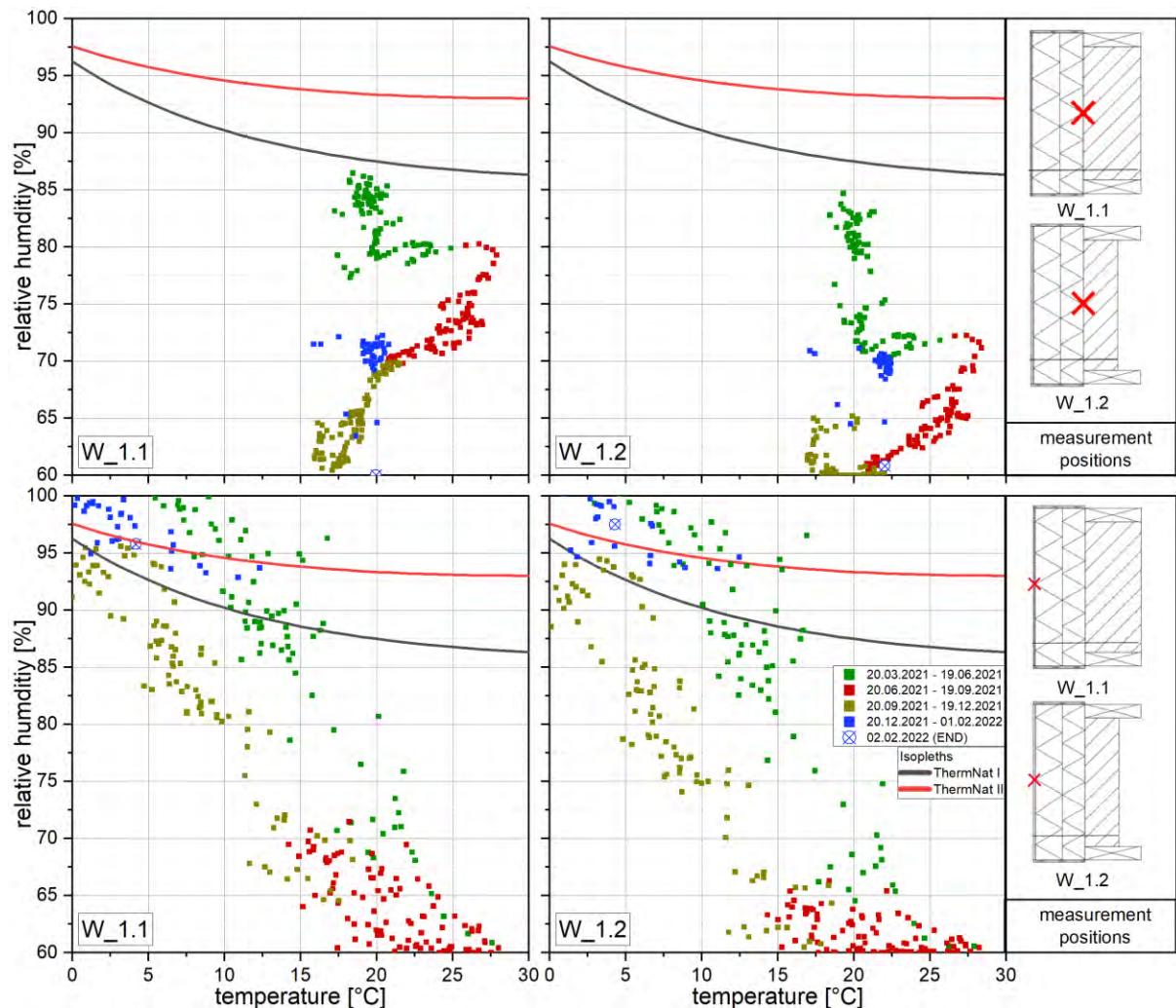


Abbildung 51: Temperatur-/Luftfeuchtekombinationen (24h-Mittel der Messwerte) am WDVS aus hydrophobierter Holzfaser aus dem Trockenverfahren (Dichte lt. Datenblatt: 110 kg/m³) unterhalb der Putzschicht (Messposition P – unten) sowie im Bauteilinneren (Messposition m – oben) für die Varianten auf 25 cm (links) und 15 cm (rechts) starken Kalksandsteinmauerwerk auf der Westfassade.

Die instationäre Holzfäuleprognose der beiden Mauerwerksvarianten auf Basis der Grenzkurve „ThermNat II“ sind in Abbildung 52 und Abbildung 53 visualisiert. Im Hinblick auf den zeitlichen Verlauf der relativen Luftfeuchte zeigt sich hier bei beiden Varianten nochmals die im Vergleich zu den im Winter aufgetragenen Putzvarianten schnell verlaufende Putzaustrocknungsphase im Frühjahr (ca. zwischen 2400 h bis 3500 h), sowie das höhere Feuchteniveau im Sommer. Nach etwa 3200 h überschreitet der Sporen- den Grenzwassergehalt und das Modell prognostiziert ein kurzzeitiges Myzelwachstum bei beiden Varianten (W 1.1: \approx 5 mm; W 1.2: \approx 3 mm). In den kurz darauffolgenden Sommermonaten kommt das Wachstum aufgrund der geringen Luftfeuchte zum Erliegen. Im Herbst 2021 (ab etwa 7000 h) steigt das Feuchteniveau am WDVS wieder stetig an und erreicht auch im darauffolgenden Winter ein Niveau von bis zu 100 % r.F. Der Sporenwassergehalt steigt bei beiden Varianten zur gleichen Zeit wieder stark an. Bei Variante W 1.2 wird der Grenzwassergehalt zum Ende der Messung

erneut überschritten. Es wird dementsprechend vom Prognosemodell ein Weiterwachsen des Myzels prognostiziert. Bei Variante W 1.1 liegt der Sporenwassergehalt gegen Ende der Messung knapp unterhalb des Grenzwassergehalts. Da die Messung an dieser Stelle abgebrochen werden musste, liegen ab diesem Zeitpunkt keine weiteren Messwerte vor. Es ist nicht auszuschließen, dass das Modell im darauffolgenden Zeitraum auch für die Variante W 1.1 ein weiteres Myzelwachstum prognostiziert hätte.

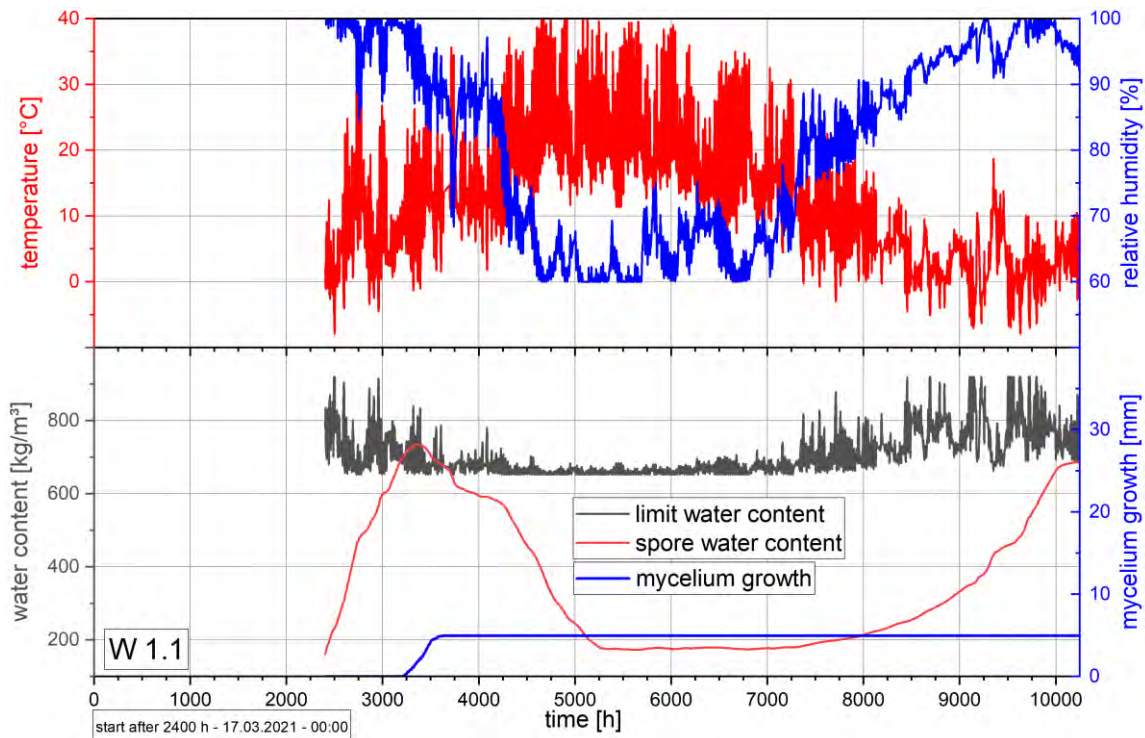


Abbildung 52: Temperatur und relative Luftfeuchte am WDVS aus hydrophobierter Holzfaser aus dem Trockenverfahren (Dichte lt. Datenblatt: 110 kg/m^3) unterhalb der Putzschiicht (Messposition P) für die Variante auf 25 cm starken Kalksandsteinmauerwerk auf der Westfassade (oben). Parallel dazu: Aus Temperatur abgeleiteter Grenzwassergehalt (Isoplethenmodell: ThermNat II), Entwicklung des instationär hergeleiteten Sporenwassergehalts und resultierendes Sporenwachstum (unten).

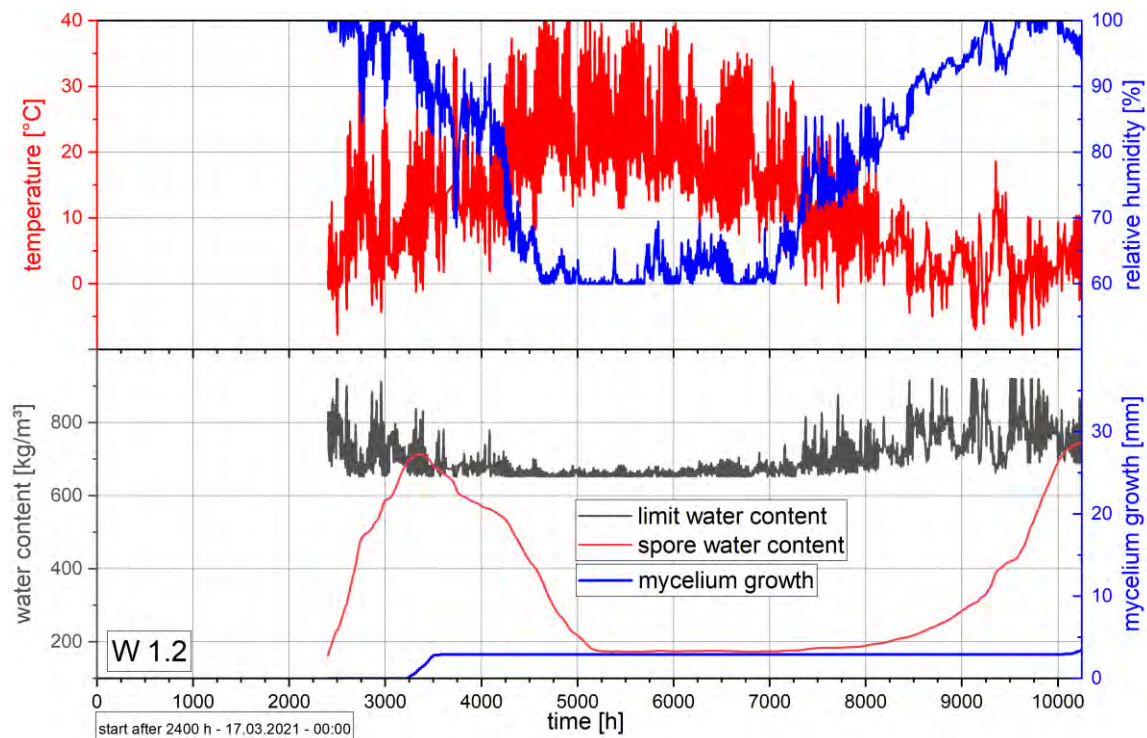


Abbildung 53: Temperatur und relative Luftfeuchte am WDVS aus hydrophobierter Holzfaser aus dem Trockenverfahren (Dichte lt. Datenblatt: 110 kg/m^3) unterhalb der Putzschicht (Messposition P) für die Variante auf 15 cm starken Kalksandsteinmauerwerk auf der Westfassade (oben). Parallel dazu: Aus Temperatur abgeleiteter Grenzwassergehalt (Isoplethenmodell: ThermNat II), Entwicklung des instationär hergeleiteten Sporenwassergehalts und resultierendes Sporenwachstum (unten).

3.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

3.4.1 Laborversuche, Grenzwerte und Prognosemodell

Die Ergebnisse der Labor-Untersuchungen zeigen, dass Holz- und Naturfaserdämmstoffe sowohl anfälliger als auch beständiger gegenüber dem Befall von holzerstörenden Pilzen sein können als Massivholz. Es sind für diese Materialien also nicht pauschal vorsichtigere Grenzwerte anzusetzen als für Holz. Manche Produkte scheinen sogar deutlich beständiger zu sein.

Auf Basis der Laborergebnisse konnten neue Grenzwerte für Holz- und Naturfaserdämmstoffe sowie ein instationäres Prognosemodell entwickelt werden. Die Labor-Ergebnisse belegen für die Kiefer-Splintholz-Referenzproben, dass früher ermittelte Grenzkurven und Modelle [17, 26] für den Abbau durch holzerstörende Pilze belastbar sind und teilweise sogar etwas mehr Sicherheit beinhalten, als erwartet. Dementsprechend ist die im Rahmen des Projekts ermittelte Grenzkurve ThermNat II für Holz und beständigere Faserdämmstoffe höher als die bisher veröffentlichten. Trotzdem verbleiben auch hier noch Sicherheiten, und das instationäre Modell prognostiziert Masseabbau analog zu [26] bei 10 °C erst ab knapp 95 % und bei 30 °C ab 93 % r.F.. Für die Kurve ThermNat I liegen die Grenzen niedriger: bei 30 °C startet der Abbau bereits ab 86 % r.F. Dies erscheint auf aktuellem Forschungsstand eher unrealistisch

niedrig. Um hier aber genauere Verläufe angeben zu können, wären weitere und detailliertere Untersuchungen erforderlich. Daher bleibt dieses niedrige Niveau aktuell ohne Alternative, bis weitere Erkenntnisse vorliegen. Trotzdem liegt auch diese Grenzkurve noch eindeutig höher als der bisher zur Verfügung stehende nur bedingt geeignete Grenzwert von 18 M.-% und liegt auf einem ähnlichen Niveau, wie die Grenzkurve aus WTA-Merkblatts-6-8 [7], die jedoch bisher für der Anwendung für Massivholz vorbehalten ist. Die Beiden Grenzkurven sind in Abbildung 32 dargestellt.

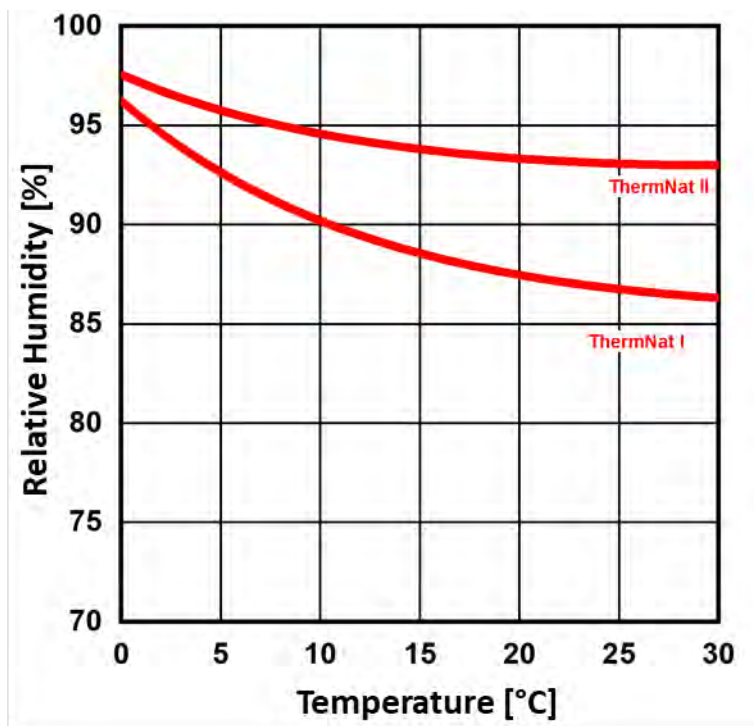


Abbildung 54: Neu ermittelte Grenzkurven für Massivholz und gleich beständige oder beständigere Naturfaserdämmstoffe (ThermNat II) sowie für weniger beständige Naturfaserdämmstoffe (ThermNat I).

Mit dem für Holzfaserdämmung weiterentwickelten und in Kapitel 3.2.3 beschriebenen, Prognosemodell lassen sich die in den Laborversuchen ermittelten Befallszustände gut und mit immer noch relativ großer Sicherheit wiedergeben.

Auch die Freilandversuche haben gezeigt, dass trotz zumindest temporär hoher Feuchtegehalte zumindest über den untersuchten Zeitraum keine Schädigung der Materialien zu erwarten ist. Hier wurde deutlich, dass Grenzkurven allein zur Bewertung von solchen Situationen nicht sinnvoll sind: Nach dem Putzauftrag wurden im Dämmstoff an der Grenze zum Putz in vielen Fällen beide Grenzkurven überschritten. Nur auf Basis der stationären und ohne instationäre Beurteilung wären also einige Systeme „durchgefallen“. Mit der instationären Bewertung ergab sich dann aber, dass die Überschreitungen meist nicht ausreichend lang andauern, um einen

Befall oder Materialabbau zu ermöglichen. In den ungünstigsten Fällen wird ein geringer Masseverlust prognostiziert, der im Versuch so allerdings nicht beobachtbar war. Allerdings konnten hierzu keine weitergehenden z.B. mikroskopischen Untersuchungen durchgeführt werden. Masseverluste sind im Freilandversuch generell nur schwer und in so geringem Umfang gar nicht ermittelbar.

3.4.2 Erkenntnisse aus den Freilandversuchen

Die Feuchteverhältnisse in den Gefachdämmungen sind allgemein eher unkritisch. Dies gilt insbesondere, wenn das außenseitige WDVS diffusionsoffen ist. Hier bleiben die Gefachdämmstoffe auf einem besonders niedrigen Feuchteniveau, bei dem sowohl die thermischen Eigenschaften besonders günstig als auch keinerlei Risiken bezüglich der Dauerhaftigkeit zu erwarten sind. Mit einer leicht dampfbremsenden EPS-Dämmung im WDVS bleiben die Feuchten etwas höher bzw. bauen sich etwas langsamer ab. Aber auch hier sind nur in geringen Umfang und kurzfristig evtl. kritische Feuchtegehalte zu beobachten.

Etwas anders sieht es in den WDVS-Dämmstoffen selbst bei Verputzung und auf Mauerwerk aus. Generell ergeben sich nach Aufbringen des Putzes hohe Feuchtegehalte, die sich jedoch bei Holzrahmenbauweise oft bereits innerhalb des ersten Jahres abbauen. Bei Südorientierung und eher dunkler Farbgebung geht dies besonders schnell, bei helleren Farbtönen und Nordorientierung entsprechend langsamer. Um die Trocknung zu beschleunigen, sollte das Verputzen der Wände optimalerweise zeitig im Frühjahr erfolgen, wodurch die Feuchtebelastung im ersten Winter minimiert wird.

Bei Mauerwerk mit Einbaufeuchte dauert die Trocknung aufgrund der im Vergleich zur Putzschicht viel höheren Menge und Speicherkapazität erheblich länger. Hier ist auf eine möglichst geringe Einbaufeuchte und guten Schutz vor Beregnung vor der Installation des WDVS zu achten, um die Systeme nicht unnötig zu belasten. Die Problematik der Feuchtemenge verschärft sich noch bei dickeren Mauerwerken, die entsprechend mehr Feuchte aufnehmen können. Einige Hersteller gewährleisten, dass Ihre Systeme und Dämmmaterialien so hohe Anfangsfeuchten temporär schadlos überstehen. Im Zweifel sollte daher auf Produkte solcher Hersteller zurückgegriffen werden. Im Sanierungsfall bei bestehenden Bauwerken ist von einer geringeren Mauerwerksfeuchte auszugehen, wodurch sich die oben beschriebene relativiert. Dennoch empfiehlt es sich auch hier, vor Aufbringung des WDVS die Mauerwerksfeuchte zumindest zu überprüfen.

Bei der nicht hydrophobierten Nassverfahrensplatte, die sich im Laborversuch als etwas anfälliger für den Abbau durch holzerstörende Pilze herausgestellt hat, zeigte im Freilandversuch an der kritischen Position unter dem Putz erkennbar geringere Feuchtegehalte als die hydrophobierten Trockenverfahrensplatten. Eine höhere Hygroskopizität sowie ein stärkerer Flüssigtransport in dieser Platte führen also zu einem niedrigeren Feuchteniveau. Dies kompensiert teilweise die höhere Sensitivität des Materials: Es ist zwar etwas *weniger* beständig, erreicht aber auch nur geringere Feuchtegehalte bei gleicher Einbausituation. Bei genauer

Kenntnis der hygrothermischen Parameter des Materials und dessen Beständigkeit gegenüber holzerstörenden Pilzen wäre hier eine genauere Analyse möglich, welche Aspekte in der Einbausituation überwiegen. Bei den aktuellen Untersuchungen ergab sich, dass die Nassverfahrensplatte trotz höherer Empfindlichkeit bei den sich einstellenden niedrigeren Feuchten einem geringeren Risiko für Holzabbau ausgesetzt war als die Trockenverfahrensplatten.

3.4.3 Ausblick: Praxisvalidierung und weitere Differenzierung

Die im Rahmen des Projekts entwickelten Grenzkurven ThermNat I und ThermNat II für unterschiedlich beständige Naturfaserdämmstoffe sowie das ergänzende instationäre Prognosemodell ermöglichen eine Beurteilung der Anwendungssicherheit der untersuchten Produkte und zeigen gute und vielversprechende Ergebnisse im Vergleich zu den durchgeführten Labor- und Freilandversuchen.

Das neue Prognosemodell muss nun noch weiter auf Praxistauglichkeit überprüft und anhand realer Konstruktionen weiter validiert werden. Dabei sollten sowohl funktionierende als auch geschädigte Bauteile bewertet werden – beides sollte das Modell wiedergeben können, wobei auch hier im Zweifel eine Schädigung eher zu früh als zu spät angezeigt werden sollte. Dabei sollte deutlich werden, ob neben bereits genannten Unsicherheiten noch bei weiteren Aspekten Änderungsbedarf besteht oder Verbesserungen möglich sind. Nach eventuellen weiteren Anpassungen und einer Bewährung in dieser Testphase kann es als praxisgerechtes Werkzeug eingesetzt werden. Dabei können die aktuell noch mit Wachstum von Myzel in [mm] ausgegebenen Prognoseergebnisse mit einem weiter validierten Faktor als Holzabbau-Indikator in [M.-%] umgesetzt werden. Dazu soll auch noch ein Ampelschema entworfen werden, das Planern bei der Bemessung von Konstruktionen eine einfache Orientierung bietet.

Perspektivisch ist es wünschenswert, die vorgeschlagenen zwei Klassen weiter zu differenzieren, sowohl auf Seiten der empfindlicheren Materialien als auch auf Seiten der beständigeren, da einige Materialien vermutlich deutlich widerstandsfähiger gegenüber holzerstörenden Pilzen sind als Splintholz. Für einzelne Materialien, die von den Klassen deutlich abweichen besteht auch die Möglichkeit, eine individuelle Kurve festzulegen. Dafür sollten noch möglichst einfache Prüfzenarien entwickelt werden. Für Dämmstoffe aus Stroh oder Schafwolle liegen bisher nur wenig Erkenntnisse vor, so dass deren Beurteilung und Anwendbarkeit besonders schwierig ist - aktuell kann für diese keine der beiden Grenzkurven herangezogen werden.

Nicht näher betrachtet wurden im Rahmen dieses Projekts die Beplankungsmaterialien. Es wurde aber deutlich, dass diese meist noch höhere Feuchtegehalte aufweisen als die Gefachdämmungen und damit tendenziell auch früher entsprechende Grenzwerte bezüglich der Dauerhaftigkeit überschreiten. Da es hier ebenfalls sehr unterschiedliche Produkte gibt, die vermutlich auch entsprechend unterschiedliche Beständigkeit gegen holzerstörende Pilze aufweisen, sollten diese Materialien künftig ebenfalls genaueren Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit unterzogen werden.

Im Anhang sind die bisherige Entwicklung und die weiteren Perspektiven für die Prognosemodelle zusammengefasst.

4 Wärmeleitfähigkeit von Naturfaserdämmstoffen

Die meisten Naturfaserdämmstoffe sind in der Lage in unterschiedlich großem Umfang Feuchte sowohl über Sorption zu speichern als auch in flüssiger Form zu transportieren. Beides beeinflusst die Messung der Wärmeleitfähigkeit im Labor, da die Materialien normalerweise nicht vollständig trocken, sondern mit der sich bei Laborkonditionierung einstellenden Gleichgewichtsfeuchte gemessen werden. Das hat zur Folge, dass bei der Wärmeleitfähigkeitsmessung u.U. nicht nur die reine Wärmeleitfähigkeit des Materials gemessen wird, sondern auch die eingangs beschriebene Umverteilung von Wärme durch die sogenannten Latentwärmeeffekte, bei denen Feuchte auf der warmen Seite verdunstet, dort Wärme entzieht und diese dann bei der Kondensation auf der Kaltseite wieder zuführt. Stellt sich bei der Messung eine undefinierte Mischung aus sensiblem (Wärmeleitung) und latentem Wärmetransport (Dampftransport mit Phasenwechsel), besteht das Risiko, beide Effekte zu vermischen und das wärmetechnische Verhalten der Materialien verfälscht wiederzugeben. Dies ist insbesondere der Fall, wenn auch der Latentwärmetransport der Wärmeleitfähigkeit zugeschlagen und diese damit höher als tatsächlich angenommen wird. Dies ist in der Vergangenheit immer wieder passiert. Bei der Zulassung wurden meist noch zusätzliche Aufschläge eingeführt, um die Erhöhung der Wärmeverluste durch die Feuchtegehalte zu berücksichtigen. Um eine realistische Materialcharakterisierung zu erreichen, ist also eine Differenzierung zwischen den beiden Effekten erforderlich. Wie dies durch entsprechend angepasster Laborversuche oder durch eine Kombination aus Laborversuchen und rechnerischen Analysen mit Hilfe hygrothermischer Simulationen erfolgen kann, wird im folgenden Kapitel untersucht.

4.1 Aktuelle Handhabung des Bemessungswerts

Zur energetischen Bemessung eines Gebäudes wird der so genannten Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit (λ_B - DE bzw. λ_r - AT) verwendet. Da die Wärmeleitfähigkeit im Material im Einbauzustand mit einem entsprechenden Feuchtegehalt i.d.R. höher ist als im trockenen Zustand (λ_{dry}), wird der Bemessungswert mit einem Zuschlag versehen. Dieser Zuschlagswert ist allerdings eine in gewissem Umfang politische Größe, die länderspezifisch in den nationalen Normen unterschiedlich geregelt ist und für die keine einheitliche Definition existiert. So bleiben Naturfaserdämmstoffe in der Schweiz je nach Einsatzbereich manchmal auch ganz ohne Zuschlag [33] während dieser in Österreich ohne Überwachung der Produktion bis zu 20 % betragen kann [9]. Es erscheint daher sinnvoll zu klären, welcher Zuschlag für energetische

Bemessungen (keine weitere Berücksichtigung der Latentwärme) bzw. hygrothermische Simulationen (mit Berücksichtigung der Latentwärme) in der Praxis sinnvoll sind. Auch eine Harmonisierung auf europäischer Ebene wäre hier wünschenswert, um landesspezifische aber nicht physikalisch erklärbare Unterschiede zu eliminieren.

In Deutschland wird der Bemessungswert für Holzfaserdämmstoffe nach DIN 4108-4 über einen Zuschlag von 5 %, mindestens aber 2 mW/mK auf den Nennwert (λ_D) ermittelt. Dieser Bemessungswert weist eine gute Übereinstimmung mit den in aktuellen und bisherigen Projekten [34] gemessenen Wärmeleitfähigkeiten der bei 80 % r.F. vorkonditionierten Holzfaserdämmstoffproben ($\lambda_{80\%}$) auf. In Abbildung 55 sind die Bemessungswerte nach DIN 4108-4 im Vergleich zu den Werten mit 20 % Zuschlag sowie zu den gemessenen Wärmeleitfähigkeiten im Trockenzustand und bei 80 % r.F. dargestellt. Dabei wird deutlich, dass der 20 %-Zuschlag deutlich zu hoch angesetzt ist und die Einbaufeuchten deutlich überzeichnet.

Allerdings ist der Zuschlag für andere Naturfaserdämmstoffe in Tabelle 5 der DIN 4108-4 pauschal mit 11 % für „sonstige pflanzliche Fasern ohne mineralische Bindemittel“ und mit 4 % für Schafwolle festgelegt. Für „Lose Zellulosefasern“ wird auf DIN EN ISO 10456 verwiesen, in der aber kein eindeutiger Zuschlagswert definiert ist. Für eine praxistaugliche energetische Bemessung eines Gebäudes mit solchen Materialien sind daher noch weitere Untersuchungen zur Festlegung der materialspezifischen Zuschläge erforderlich.

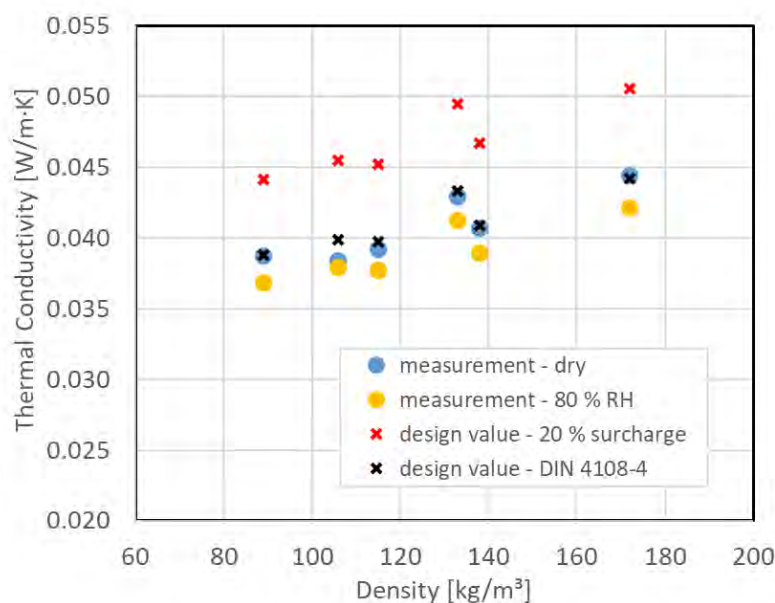


Abbildung 55: Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmstoffen. Vergleich mit Mess- und Bemessungswerten.

Wie die Nachberechnung der Wärmeleitfähigkeitsmessung gezeigt hat, ist die feuchtebedingte Wärmeleitfähigkeitserhöhung bis 95 % r.F. in der Messung der bei 80 % r.F. konditionierten Naturfaserdämmstoffen bereits implizit enthalten (Kapitel 4.5). Ferner wird in einer Simulationsstudie über innengedämmte Außenwände [35] darauf hingewiesen, dass die Ermittlung

des R-Werts im Vergleich zu dem aus der Simulation ermitteltem R-Wert während der Heizperiode (Oktober bis April) mit der Wärmeleitfähigkeit des feuchten Materials ($\lambda_{80\%}$) leicht niedriger liegt. Dies gilt zumindest unter mitteleuropäischen Klimaverhältnissen. Die maximale r.F. in den simulierten innengedämmten Außenwänden mit zwei verschiedenen Holzfasermaterialien (Trockenverfahren, Dichte 110 kg/m^3 und Nassverfahren, Dichte 160 kg/m^3) erreichen unter sehr kritischen Bedingungen nur temporär knapp 100 % r.F. an der Außenseite, während sie im mittleren Bereich des Dämmmaterials unter 80 % r.F. bleiben. Diese Ergebnisse deuten bereits darauf hin, dass ein Zuschlag von 20 % sowohl für hygrothermische Materialdaten als auch für die Anwendungspraxis deutlich zu hoch liegt. Dieser Aspekt wird bei der Bewertung der Freilandversuche nochmals überprüft.

4.2 Ergebnisse der in-situ Wärmestrommessung

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur simulationsbasierten Nachbildung der in-situ Wärmestrommessungen dargelegt. Für Simulation ist das Programm WUFI® verwendet. Lt. Herstellerangaben der Wärmestromplatten sollte bei Aufbauten mit sehr niedrigen U-Werten für eine belastbare Messung das durchschnittliche $\Delta T > 20 \text{ K}$ sein. Für den Simulationsabgleich wurden deshalb die gleitenden 24h-Mittelwerte der jeweiligen Wärmeströme im Zeitraum zwischen dem 11.01.2022 und dem 01.02.2022 herangezogen. ΔT lag in diesem Zeitraum im Schnitt bei ca. $20,5 \text{ K}$. Eine detaillierte Auswertung aller Messkonstellationen wird in [36] behandelt. Des Weiteren wird in [37] auf Basis der Wärmestrommessungen an den hinterlüfteten Varianten etwas detaillierter auf das Wärmeschutzpotential von Schafwolle und Stroheinblasdämmung eingegangen.

In Abbildung 56 ist der Simulationsabgleich der Variante mit Mineralwolle und EPS WDVS Fassade aufgetragen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Wärmeströmen über den betrachteten Zeitraum. Betrachtet man jeweils die berechneten durchschnittlichen dynamischen Wärmedurchlasskoeffizienten (Λ_{dyn}), so liegen diese mit $0,101 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $0,099 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf einem vergleichbaren Niveau. Das verwendete Simulationsmodell führt also zu realistischen Ergebnissen. Gegenüber den Erwartungswerten ist der Λ_{dyn} in der Simulation um $0,001 \text{ W/m}^2\text{K}$ (1 %) erhöht. Bei Betrachtung der Wärmeströme aus der Simulation ohne Latentwärmeeffekte (blaue Linie) liegt Λ_{dyn} mit einem Wert von $0,098 \text{ W/m}^2\text{K}$ exakt auf dem Niveau des Erwartungswertes. Daraus lässt sich schließen, dass diese Effekte vermutlich auch bei der in-situ Messung zur Erhöhung des Messwertes um $0,003 \text{ W/m}^2\text{K}$ (3 %) geführt haben.

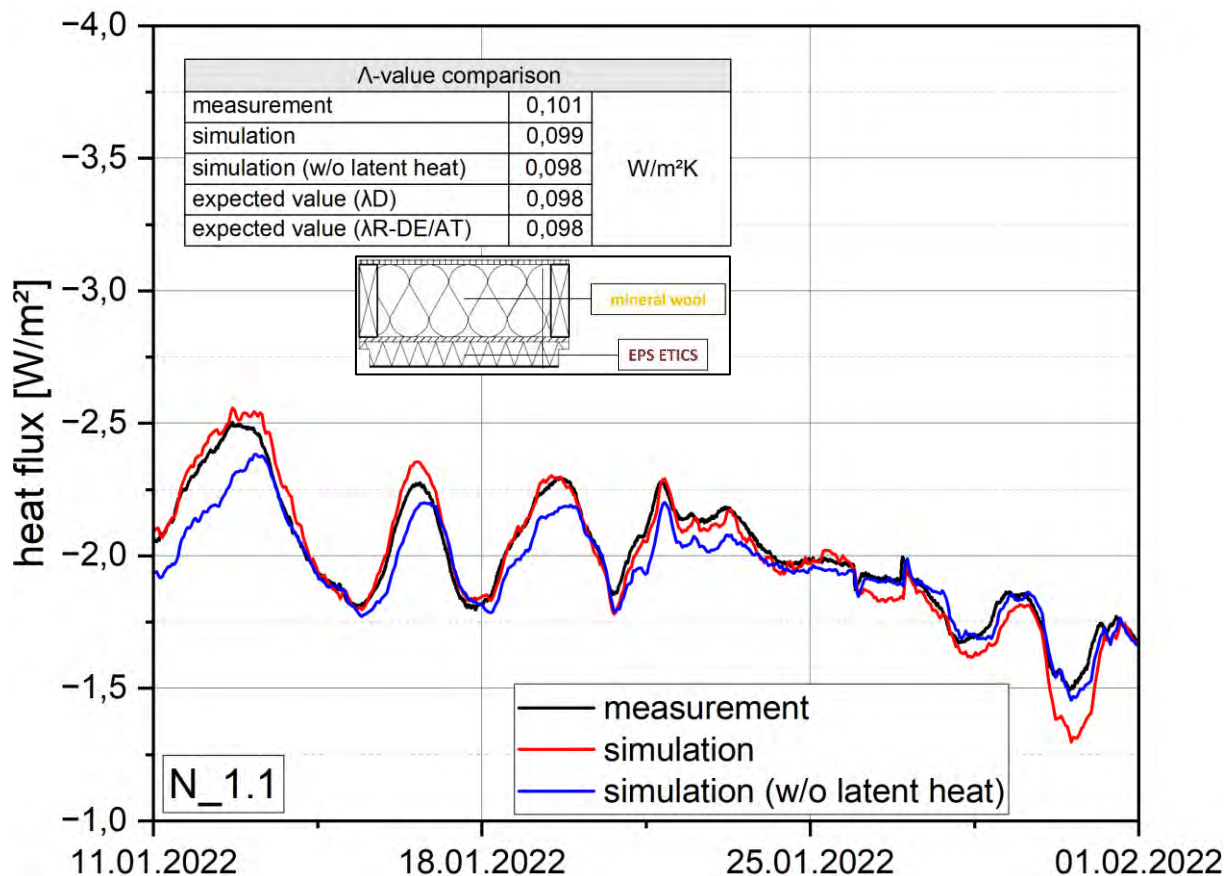


Abbildung 56: Abgleich zwischen den gemessenen und simulierten Wärmeströmen (24h Mittelwert, gleitend) des Aufbaus mit Mineralwollgefachdämmung und EPS WDVS (N 1.1). Tabellarische Auflistung der durchschnittlichen dynamischen Wärmedurchlasskoeffizienten (Λ_{dyn}) im Mess- bzw. Simulationszeitraum sowie deren für den betrachteten Zeitraum berechneten Erwartungswert auf Basis der Herstellerangaben zu Nenn- (λ_D) und Bemessungswerten (λ_r) der Dämmstoffe.

Betrachtet man im Vergleich dazu den Aufbau mit Mineralwolle und WF-WDVS Fassade (N 2.1, Abbildung 57), so zeigt sich ebenfalls eine relativ gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung. Der Unterschied zwischen den berechneten Λ_{dyn} -Werten auf Basis der gemessenen und simulierten Wärmeströme ist mit $0,004 \text{ W/m}^2\text{K}$ (3,7 %) etwas größer als bei der Variante mit EPS WDVS Fassade (1 %). Der aus der Simulation hervorgehende Wärmedurchlasskoeffizient liegt gegenüber den Erwartungswerten je nach Bezugswert um $+0,005 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Nennwert), $+0,004 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Bemessungswert AT) und $+0,003 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Bemessungswert DE) höher. Diese Differenzen sind allesamt höher als bei der EPS Variante. Mit deaktivierten Latentwärmeeffekten ergibt sich aus den entsprechend simulierten Wärmeströmen ein Λ_{dyn} von $0,101 \text{ W/m}^2\text{K}$, was exakt dem berechneten Erwartungswert auf Basis der Nennwerte entspricht. Die erhöhten Wärmeströme in der Simulation lassen sich also zur Gänze auf jene Effekte zurückführen. Sie fallen bei dieser Variante (Holzfaser-WDVS) höher aus als bei der Vergleichsvariante mit EPS WDVS. Es ist anzunehmen, dass zumindest ein großer Teil der erhöhten Wärmestromdichte, während der in-situ Messung auf Latentwärmeeffekte im WF WDVS zurückzuführen ist.

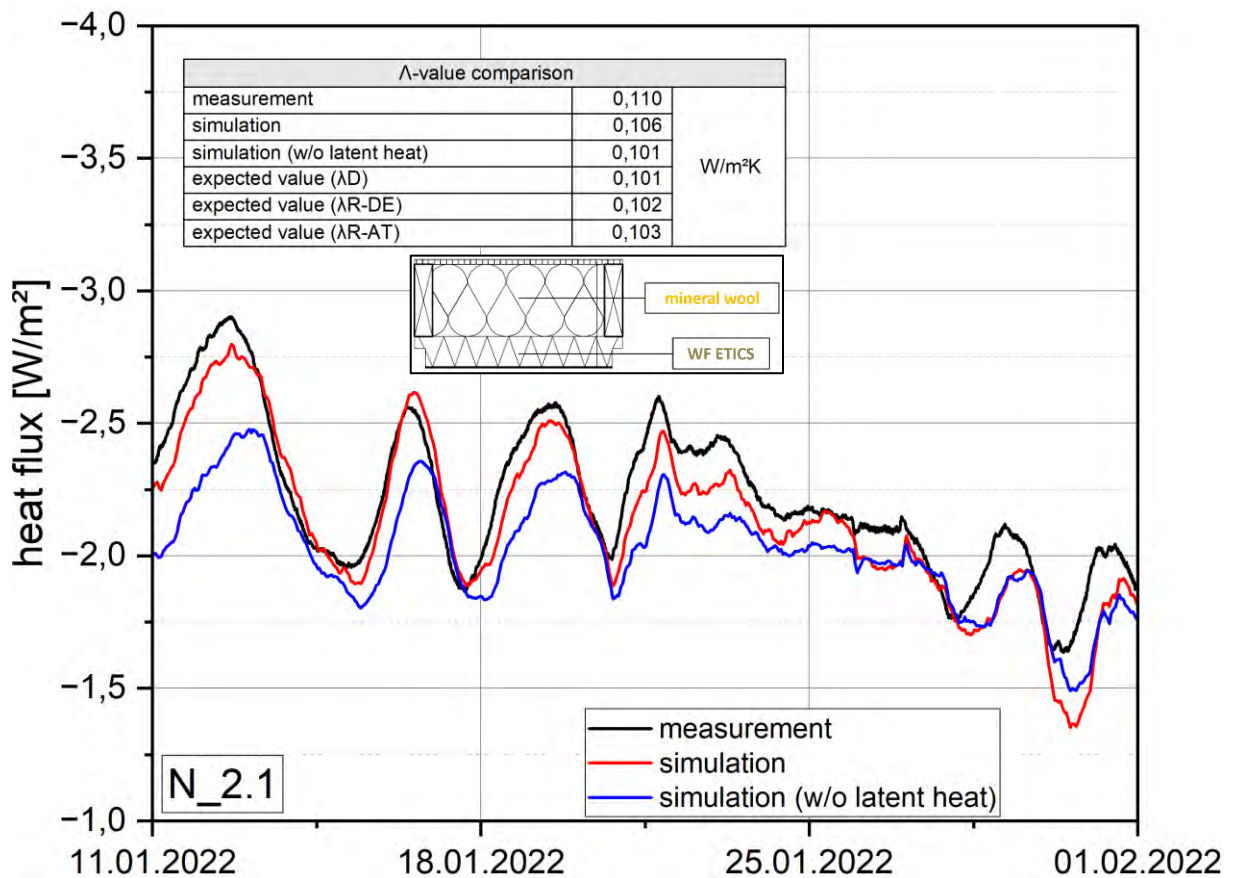


Abbildung 57: Abgleich zwischen den gemessenen und simulierten Wärmeströmen (24h Mittelwert, gleitend) des Aufbaus mit Mineralwollgefachdämmung und WF WDVS (N 2.1). Tabellarische Auflistung der durchschnittlichen dynamischen Wärmedurchlasskoeffizienten (Λ_{dyn}) im Mess- bzw. Simulationszeitraum sowie deren für den betrachteten Zeitraum berechneten Erwartungswert auf Basis der Herstellerangaben zu Nenn- (λ_D) und Bemessungswerten (λ_R) der Dämmstoffe.

Abbildung 58 zeigt den Simulationsabgleich der Variante N 2.1 mit Holzfaser-Gefachdämmung und WF WDVS Fassade. Auch hier liegen simulierte und gemessene Wärmeströme hinreichend nahe beieinander. Die Differenz von Λ_{dyn} zwischen Simulation und Messung beträgt $0,001 \text{ W/m}^2\text{K}$ (0,8 % bezogen auf den Messwert). Ohne Latentwärmeeffekte simuliert liegt Λ_{dyn} bei $0,109 \text{ W/m}^2\text{K}$, was wie auch bei den oben beschriebenen Varianten (vgl. Abbildung 56 und Abbildung 57) dem errechneten Erwartungswert auf Basis der Nennwerte für diesen Wand-aufbau entspricht. Wie auch bei den vorigen Varianten lässt sich die Differenz zwischen dem aus den Messungen hervorgehenden und dem auf Basis der Nennwerte berechneten Λ_{dyn} demnach auch hier durch feuchtebedingte Sorptionsvorgänge im Holzfaserwolle und der daraus resultierenden Latentwärmebilanz erklären. Im Vergleich zur EPS WDVS Variante mit Mineralwolle-Gefachdämmung (N 1.1, Abbildung 56) liegt hier der Anteil des latentwärmeebedingten Anstiegs von Λ_{dyn} , der aus den jeweiligen Simulationen hervorgeht um $0,006 \text{ W/m}^2\text{K}$ höher. Dieser beträgt bei N 1.1 $+0,002 \text{ W/m}^2\text{K}$ (1 %) und bei N 1.2 $+0,008 \text{ W/m}^2\text{K}$ (6,8 %).

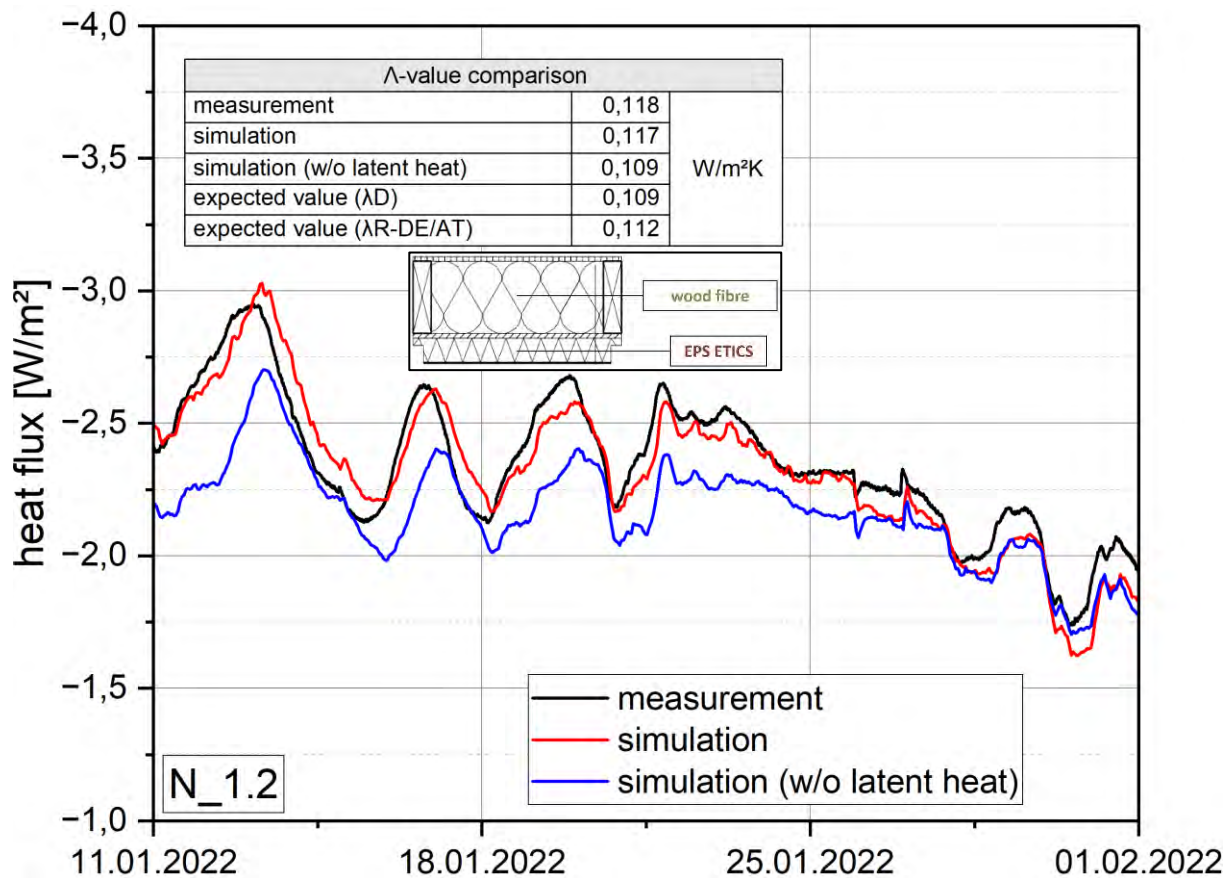


Abbildung 58: Abgleich zwischen den gemessenen und simulierten Wärmeströmen (24h Mittelwert, gleitend) des Aufbaus mit Holzfasergefachdämmung und EPS WDVS (N 1.2). Tabellarische Auflistung der durchschnittlichen dynamischen Wärmedurchlasskoeffizienten (Λ_{dyn}) im Mess- bzw. Simulationszeitraum sowie deren für den betrachteten Zeitraum berechneten Erwartungswert auf Basis der Herstellerangaben zu Nenn- (λ_D) und Bemessungswerten (λ_R) der Dämmstoffe.

Der Simulationsabgleich der Aufbauvariante mit Holzfaserwoll-Gefachdämmung und WF WDVS Fassade (N 2.2, Abbildung 59) zeigt die gleichen qualitativen Tendenzen wie bereits in Bezug auf Abbildung 56 bis Abbildung 58 im Detail beschrieben. Der Anteil des latentwärmebedingten Anstiegs (in den Simulationen) von Λ_{dyn} ist hier noch etwas höher als bei Variante N 1.2 und liegt bei +0,009 W/m²K (7,6 %). Der Messwert des dynamischen Wärmedurchlasskoeffizienten liegt um +0,011 W/m²K (8,3 %) höher als der auf Nennwertbasis berechnete Λ_{dyn} . Es ist anzunehmen, dass bei dieser Variante aufgrund der Kombination zweier sorptiver Dämmstoffe (Gefach und WDVS) die sorptionsbedingten Latentwärmeeffekte auf einem höheren Niveau liegen als bei den bis hierher betrachteten Varianten, bei denen entweder nur der Gefachdämmstoff (N 1.2), oder nur das WDVS (N 2.1), oder keines von beiden (N1.1) aus einem sorptiven Material besteht.

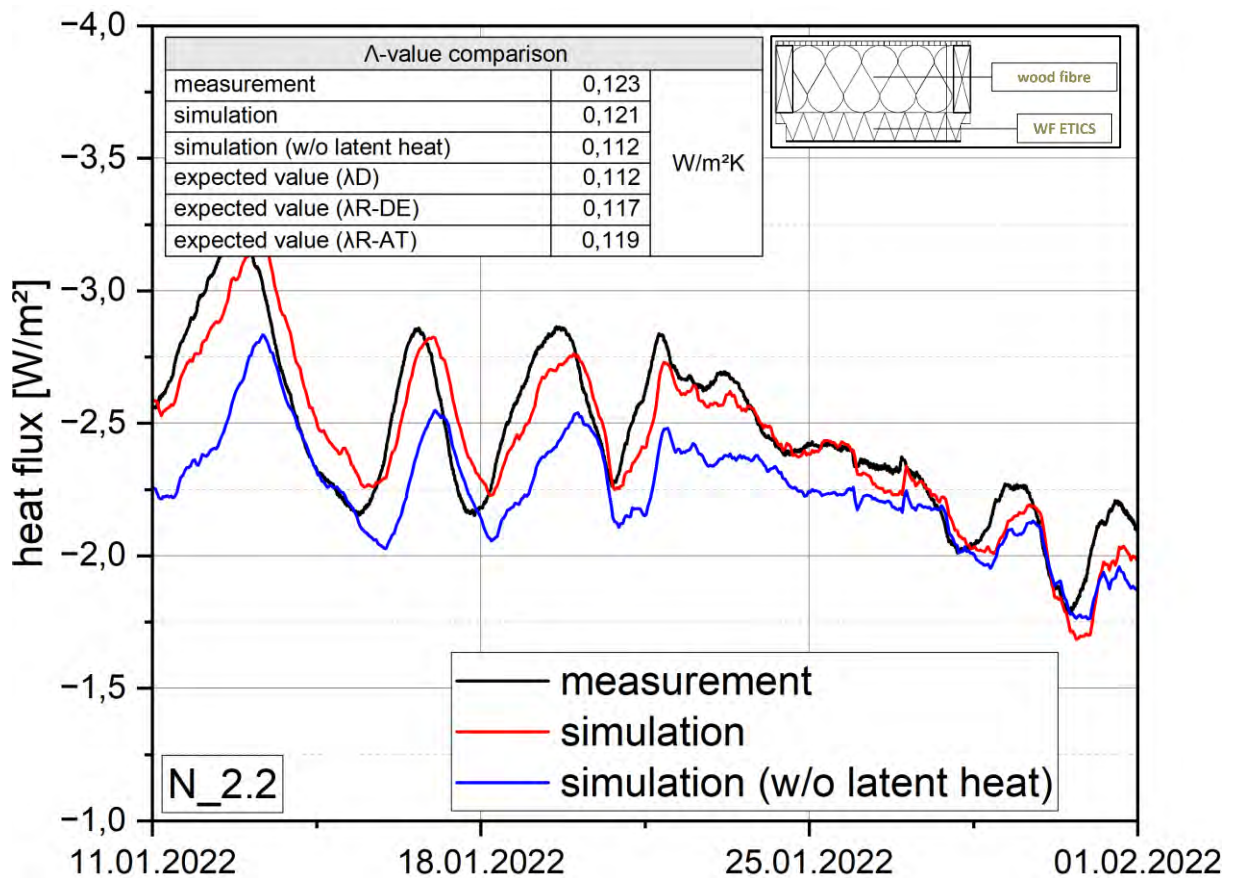


Abbildung 59: Abgleich zwischen den gemessenen und simulierten Wärmeströmen (24h Mittelwert, gleitend) des Aufbaus mit Holzfasergefachdämmung und WF WDVS (N 2.2).
Tabellarische Auflistung der durchschnittlichen dynamischen Wärmedurchlasskoeffizienten (Λ_{dyn}) im Mess- bzw. Simulationszeitraum sowie deren für den betrachteten Zeitraum berechneten Erwartungswert auf Basis der Herstellerangaben zu Nenn- (λ_D) und Bemessungswerten (λ_r) der Dämmstoffe.

Die oben beschriebenen Ergebnisse in Bezug auf Abbildung 56 bis Abbildung 59 lassen den Schluss zu, dass im betrachteten Messzeitraum die gemessenen Wärmeströme aufgrund von Sorptions- und Desorptionsvorgängen und der dadurch erzeugten positiven Latentwärmebilanz auf einem erkennbar höheren Niveau lagen, als man auf Basis der Nenn- und Bemessungswerte erwarten würde. Dies trifft vor allem auf die betrachteten Varianten mit sorptiven Dämmmaterialien (Holzfaser-Gefachdämmung, Holzfaser-WDVS) zu. Sorptionsvorgänge können auch in die entgegengesetzte Richtung ablaufen wodurch Wärmeenergie frei wird [2]. Aus physikalischer Sicht ist die gesamte Energie, die während der kälteren Jahreshälfte im Aufbau in Form von Latentwärme gespeichert wird, reversibel und wird in der wärmeren Jahreshälfte wieder freigegeben. Dadurch würden die Wärmeströme in dieser Zeit reduziert (reduziertes Λ_{dyn}). Liegt eine derartige Phase in der Heizperiode vor, würde dadurch die Wärmeschutzperformance des Bauteils in dieser Zeit erhöht werden. Es ist deshalb anzunehmen, dass sich die enthalpiebedingten Wärmeverluste zumindest zum Teil wieder zurückgewinnen lassen. Die Jahresdurchschnittswerte der dynamischen Wärmedurchlasskoeffizienten liegen

somit sicherlich auf einem geringeren Niveau als die auf Basis der in-situ Messung berechneten Werte von Λ_{dyn} . Dennoch ist nicht davon auszugehen, dass die gesamte im Dämmstoff gespeicherte Latentwärme während der für die Wärmeschutzperformance relevanten Heizperiode wieder freigegeben wird, sondern während der wärmeren Jahreshälfte. Deshalb ist ein gewisser Feuchtezuschlag für die hier betrachteten Dämmstoffvarianten aufgrund der Latentwärmeverluste sicherlich gerechtfertigt. Ob die Feuchtezuschläge für Holzfaserdämmstoffe, wie sie derzeit in der ÖNORM EN ISO 10456 (AT) [38] bzw. DIN 4108-4 (DE) [10] normativ verankert sind im Jahresverlauf realistische Mittelwerte für die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit liefern, kann aus den Freilandmessungen leider nicht abschließend hergeleitet werden. Sie deuten aber darauf hin, dass der Zuschlag von 5 % auf den Nennwert für Holzfaserdämmstoffen nach DIN 4108-4 im Jahresmittel angemessen ist. Ein pauschaler Feuchtezuschlag auf pflanzliche Faserdämmstoffe von 20 %, wie er in der ÖNORM B 6015-2 angesetzt wird, liegt dagegen deutlich zu hoch.

In Abbildung 60 ist der Simulationsabgleich der Aufbauvariante mit Zellulose-Einblasdämmung und EPS WDVS dargestellt. Die Differenz zwischen den Λ_{dyn} aus Simulation und Messung zeigt sich hier höher als bei den bisher betrachteten Varianten ($\pm 0,014 \text{ W/m}^2\text{K}$, 10,8 %), wobei aus den Messungen ein höherer Λ_{dyn} hervorgeht als aus der Simulation. Die Erwartungswerte werden in der Simulation/Messung jeweils um $0,008/0,022 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Nennwert), $0,005/0,019 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Bemessungswert DE) und $0,006/0,020 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Bemessungswert AT) überschritten. Wieder lässt sich die Überschreitung in der Simulation durch Latentwärmeverluste erklären. Denn bei Deaktivierung dieses Effekts entspricht Λ_{dyn} genau dem nennwertbasierten Erwartungswert.

Die Vergleichsvariante mit WF WDVS (Abbildung 61) zeigt tendenziell vergleichbare Ergebnisse. Die oben beschriebenen Abweichungen vom Erwartungswert liegen hier auf einem etwas höheren Niveau als mit EPS WDVS.

Die Erwartungswertüberschreitungen des messwertbasierten Λ_{dyn} lassen sich nicht ausschließlich durch feuchtebedingte Effekte erklären. Eine Bestimmung der Dichte im Anschluss an die Messung hat ergeben, dass die optimale Einblasdichte bei den hier vorliegenden Versuchsaufbauten deutlich überschritten wurde und außerhalb des Zulassungsbereichs für das vorliegende Produkt liegt ($75\text{-}90 \text{ kg/m}^3$ anstatt $40\text{-}65 \text{ kg/m}^3$). Bei zu hoher (oder zu niedriger) Dichte erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit des Einblasdämmstoffs [39], was in diesem Versuch vermutlich zu den etwas ausgeprägteren Erwartungswertüberschreitungen geführt hat. Zusätzlich ist nicht auszuschließen, dass mit zunehmender Dichte auch das Wasseraufnahmepotential in kg/m^3 ansteigt. Aus erhöhter Dichte ergibt sich eine größere spezifische Faseroberfläche (m^2/m^3). Die Anzahl der polaren Gruppen (OH-Gruppen), an denen sich Wasser physisorptiv anlagern kann [40] nimmt entsprechend zu, wodurch eine größere absolute Wassermenge von der Zellulose aufgenommen werden kann [41]. Das Rohmaterial, das zur Erzeugung der Einblasdämmung verwendet wurde, könnte ebenfalls eine Rolle spielen [34].

Aus vielen Untersuchungen geht hervor, dass Zellulose bei Einhaltung sämtlicher Richtwerte inkl. der notwendigen Einblasdichte eine weitaus bessere Wärmeschutzperformance bietet, als in den hier vorliegenden Untersuchungen an den Varianten mit deutlich zu hoher Einblasdichte [42].

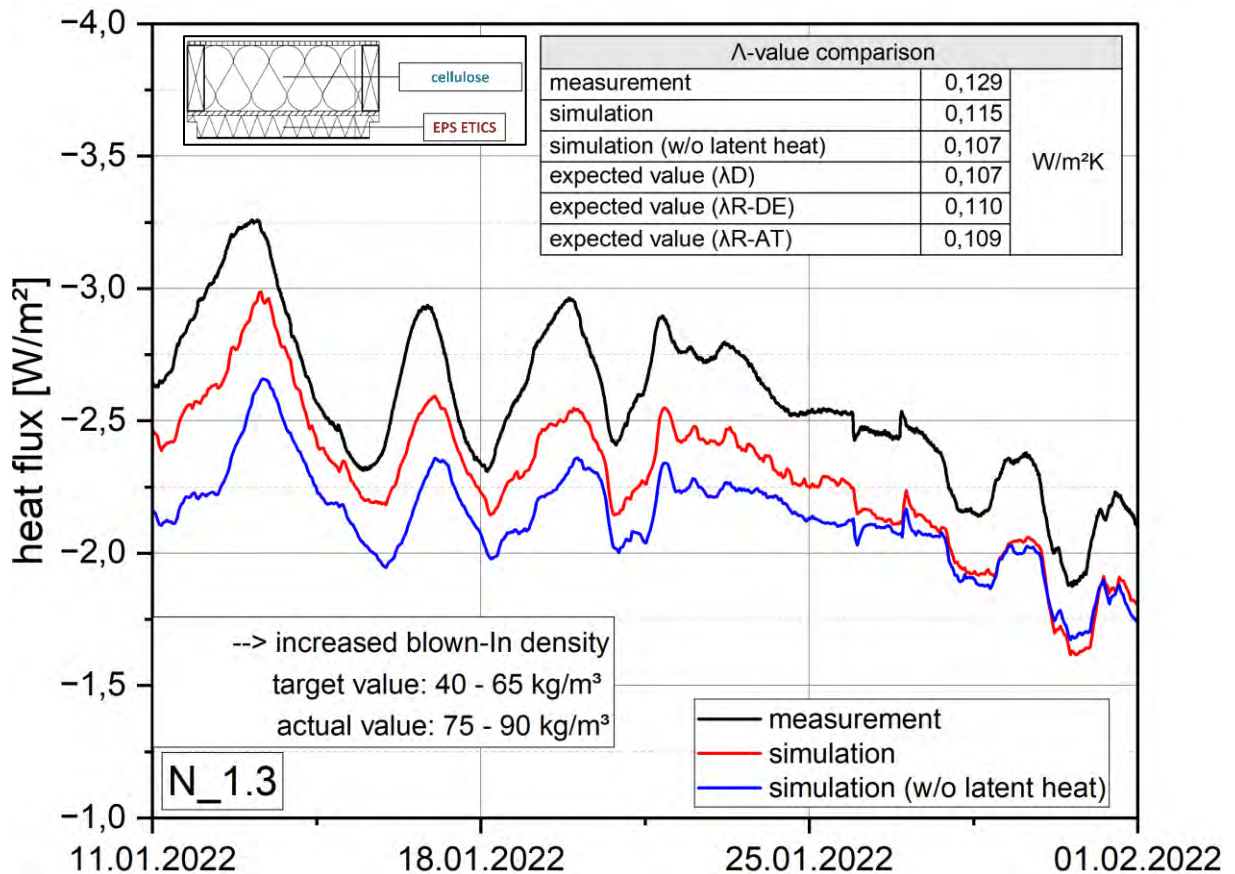


Abbildung 60: Abgleich zwischen den gemessenen und simulierten Wärmeströmen (24h Mittelwert, gleitend) des Aufbaus mit Zelluloseeinblasdämmung und EPS WDVS (N 1.3).
Tabellarische Auflistung der durchschnittlichen dynamischen Wärmedurchlasskoeffizienten (Λ_{dyn}) im Mess- bzw. Simulationszeitraum sowie deren für den betrachteten Zeitraum berechneten Erwartungswert auf Basis der Herstellerangaben zu Nenn- (λ_D) und Bemessungswerten (λ_R) der Dämmstoffe.

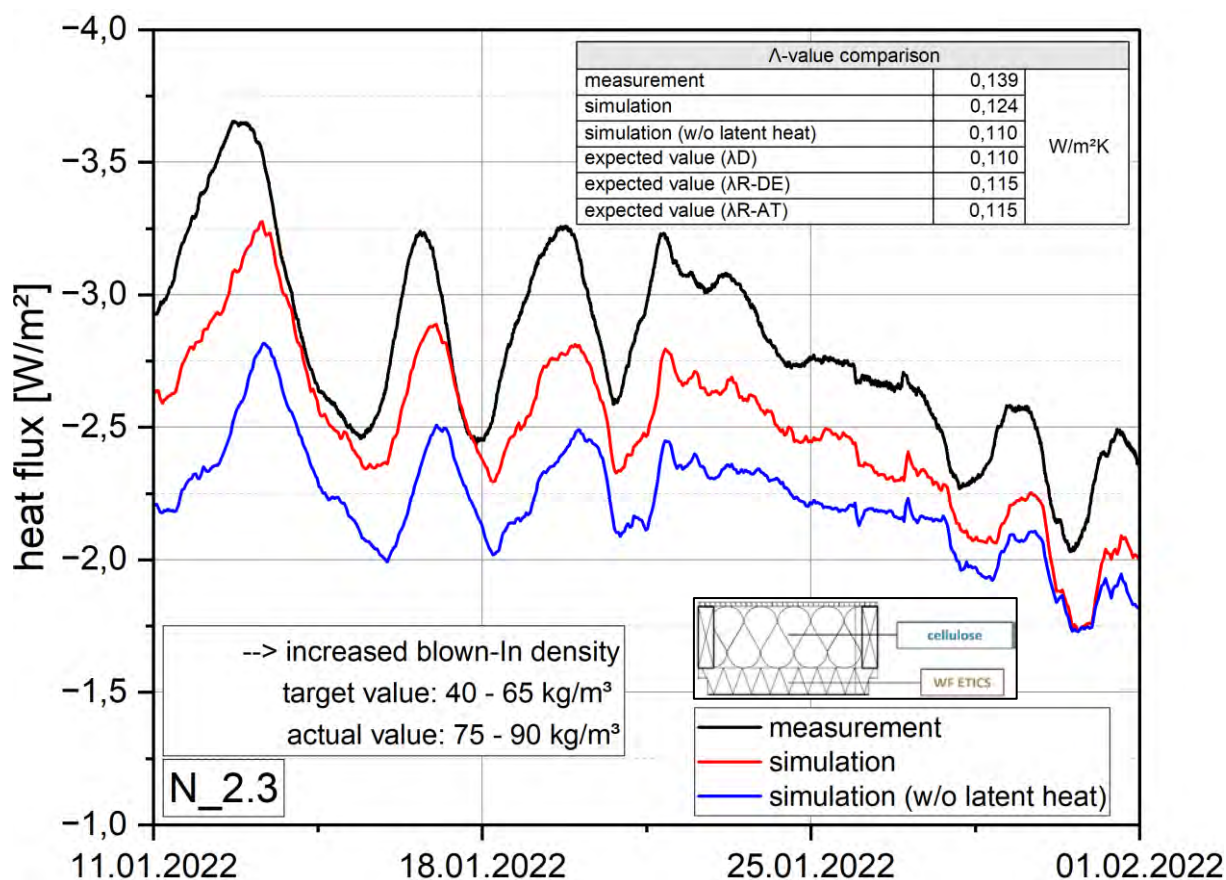


Abbildung 61: Abgleich zwischen den gemessenen und simulierten Wärmeströmen (24h Mittelwert, gleitend) des Aufbaus mit Zelluloseeinblasdämmung und WF WDVS (N 2.3).
Tabellarische Auflistung der durchschnittlichen dynamischen Wärmedurchlasskoeffizienten (Λ_{dyn}) im Mess- bzw. Simulationszeitraum sowie deren für den betrachteten Zeitraum berechneten Erwartungswert auf Basis der Herstellerangaben zu Nenn- (λ_D) und Bemessungswerten (λ_r) der Dämmstoffe.

Die Ergebnisse aus den Simulationsabgleichen der Aufbauvarianten mit Schafwolle-Gefachdämmung sind in Abbildung 62 (N 1.4, EPS WDVS) und Abbildung 63 (N 2.4, WF WDVS) zu sehen. Bei der Aufbauvariante mit EPS WDVS zeigt sich keine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung. Die Wärmeströme werden in der Simulation etwas unterschätzt ($\Lambda_{\text{dyn, Simulation}} = 0,116 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Lambda_{\text{dyn, Messung}} = 0,124 \text{ W/m}^2\text{K}$). Das gemessene Feuchteniveau (blaue Strichlinien) im Gefach lag während des Messzeitraums im Mittel zwischen 62 % und 65 % r.F. An der Gefachaußenseite betrug das Niveau durchgehend > 80 % r.F. Bei der Aufbauvariante mit WF WDVS zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung ($\Lambda_{\text{dyn, Simulation}} = 0,121 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Lambda_{\text{dyn, Messung}} = 0,119 \text{ W/m}^2\text{K}$). Die relative Luftfeuchte lag im Messzeitraum hier im Mittel zwischen 54 % und 57 % r.F. An der Gefachaußenseite blieb das Feuchteniveau dabei < 75 % r.F.

In beiden Fällen stimmen die dynamischen Wärmedurchlasskoeffizienten aus den Simulationen ohne Latentwärmeeffekte mit den nennwertbasierten Erwartungswerten überein ($0,111 \text{ W/m}^2\text{K}$ bzw. $0,114 \text{ W/m}^2\text{K}$). Da für die verwendete Schafwolle kein produktspezifischer hygrothermischer Datensatz verfügbar war, wurden für die Simulation die Daten einer Schafwolle

eines anderen Herstellers herangezogen. Die Ergebnisse aus Simulationen und Messung lassen vermuten, dass dieser Datensatz die Sorptionseigenschaften des hier verwendeten Schafwollprodukts im höheren Feuchtebereich nicht realitätsgetreu abbildet. Dadurch ergibt sich in der Simulation der EPS Variante (N 1.4, Abbildung 62) eine zu ungenaue Latentwärmebilanz auf höherem Luftfeuchteniveau, die zur Unterschätzung der Wärmeströme führt. Die Sorptionseigenschaften sind stark produktabhängig und werden durch die Zugabe und Konzentration verschiedener Zusatzstoffe (z.B. Insektizide, Fungizide, Hydrophobierungsmittel etc.) stark beeinflusst – dementsprechend wären produktspezifische Datensätze für eine genauere Nachberechnung erforderlich.

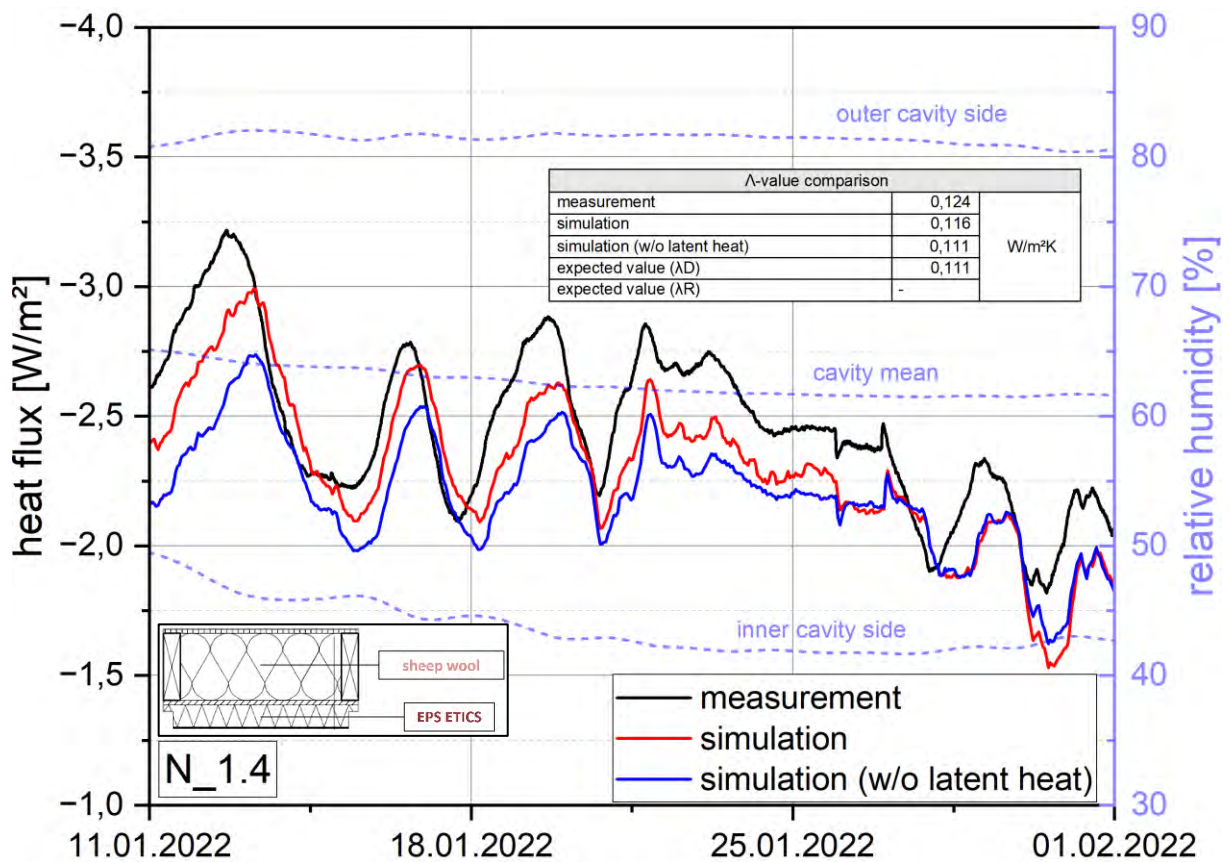


Abbildung 62: Abgleich zwischen den gemessenen und simulierten Wärmeströmen (24h Mittelwert, gleitend) des Aufbaus mit Schafwoll- und EPS-WDVS (N 1.4), sowie das Luftfeuchteniveau an verschiedenen Stellen im Gefach. Tabellarische Auflistung der durchschnittlichen dynamischen Wärmedurchlasskoeffizienten (Λ_{dyn}) im Mess- bzw. Simulationszeitraum sowie deren für den betrachteten Zeitraum berechneten Erwartungswert auf Basis der Herstellerangaben zum Nennwert (Λ_D) der Dämmstoffe.

Betrachtet man jeweils die Abweichung zwischen messwert- und nennwertbasiertem dynamischen Wärmedurchlasskoeffizienten, so ergibt sich für die EPS Variante ein um $0,013 \text{ W/m}^2\text{K}$ (+ 11,7 %) und für die WF Variante ein um $0,005 \text{ W/m}^2\text{K}$ (+ 4,4 %) erhöhtes Λ_{dyn} . Die Ergebnisse des Abgleichs deuten daher im weiteren Sinne darauf hin, dass diffusionsoffene Fassadensysteme nicht nur vorteilhaft für die Dauerhaftigkeit von Außenwandbauteilen sind (siehe

Kapitel 3.3.1), sondern aufgrund geringerer Feuchte im Gefach auch einen positiven Beitrag zur Wärmeschutzperformance leisten können.

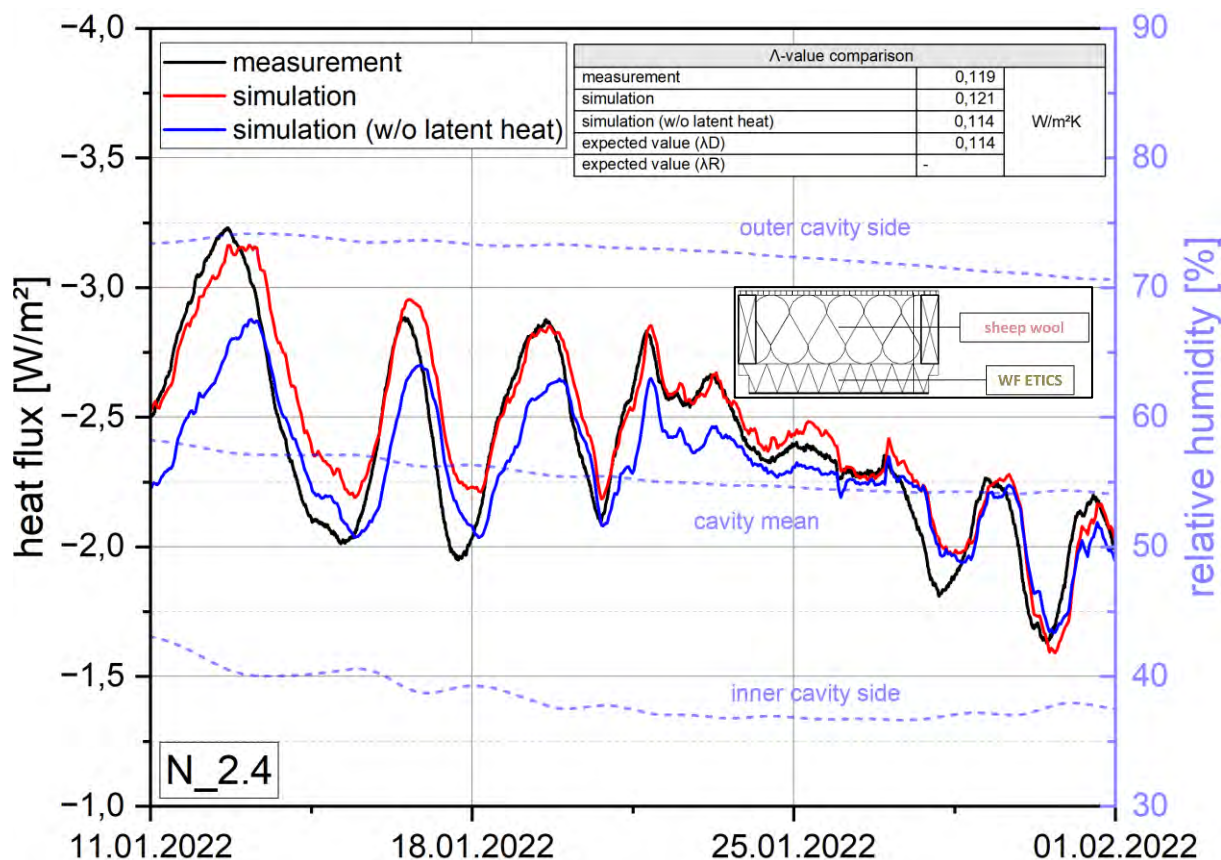


Abbildung 63: Abgleich zwischen den gemessenen und simulierten Wärmeströmen (24h Mittelwert, gleitend) des Aufbaus mit Schafwollendämmung und WF WDVS (N 2.4), sowie das Luftfeuchteniveau an verschiedenen Stellen im Gefach. Tabellarische Auflistung der durchschnittlichen dynamischen Wärmedurchlasskoeffizienten (Λ_{dyn}) im Mess- bzw. Simulationszeitraum sowie deren für den betrachteten Zeitraum berechneten Erwartungswert auf Basis der Herstellerangaben zum Nennwert (λ_{D}) der Dämmstoffe.

In Abbildung 64 sind die Ergebnisse des Simulationsabgleichs für die Variante mit Stroheinblasdämmung im Gefach und EPS WDVS Fassade aufgetragen. Aus den Messungen geht ein deutlich geringerer dynamischer Wärmedurchlasskoeffizient hervor, als es auf Basis der Nennwerte zu erwarten wäre ($\Lambda_{\text{dyn, Messung}} = 0,129 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Lambda_{\text{dyn, Nennwerte}} = 0,138 \text{ W/m}^2\text{K}$). Bei Annahme einer konstanten Wärmeleitfähigkeit (feuchteunabhängig, mit Latentwärmeeffekten) der Stroheinblasdämmung von $0,055 \text{ W/mK}$ ($\cong \lambda_{\text{D}}$) werden die Wärmeströme in der Simulation deutlich überschätzt ($\Lambda_{\text{dyn, Simulation, 055}} = 0,146 \text{ W/m}^2\text{K}$). Bei Annahme eines konstanten λ von $0,044 \text{ W/mK}$ liegen simulierte und gemessene Wärmeströme relativ nahe beieinander ($\Lambda_{\text{dyn, Simulation, 044}} = 0,132 \text{ W/m}^2\text{K}$), was darauf hindeutet, dass der Nennwert (λ_{D}) der hier verwendeten Stroheinblasdämmung mit $0,055 \text{ W/mK}$ zu hoch angesetzt ist.

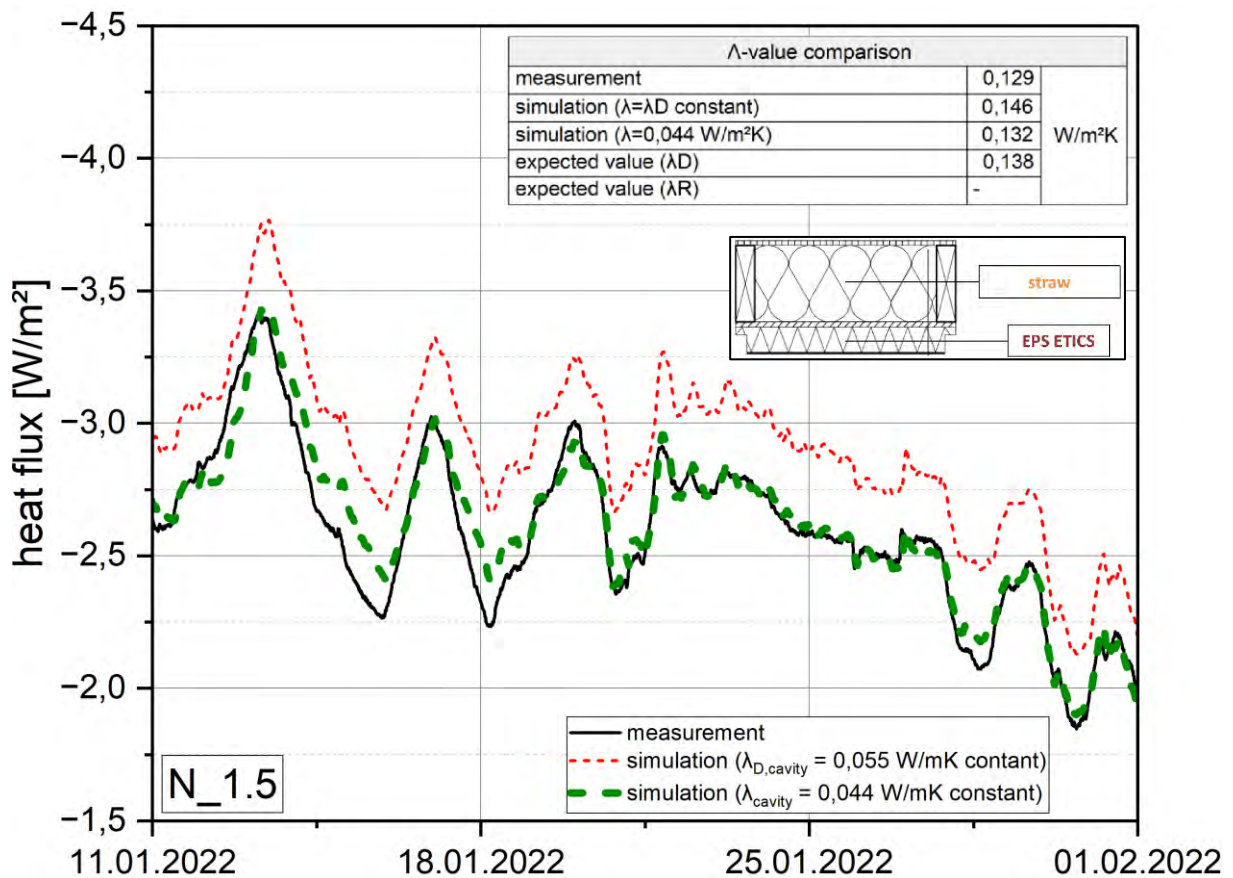


Abbildung 64: Abgleich zwischen den gemessenen und simulierten Wärmeströmen (24h Mittelwert, gleitend) des Aufbaus mit Stroheinblasdämmung und EPS WDVS (N 1.5). Tabellarische Auflistung der durchschnittlichen dynamischen Wärmedurchlasskoeffizienten (Λ_{dyn}) im Mess- bzw. Simulationszeitraum sowie deren für den betrachteten Zeitraum berechneten Erwartungswert auf Basis der Herstellerangaben zum Nennwert (λ_D) der Dämmstoffe.

Auch bei der Strohvariante mit WF WDVS (N 2.5, Abbildung 65) zeigt sich der messwertbasierte klar unterhalb des nennwertbasierten Wärmedurchlasskoeffizienten ($\Lambda_{dyn, Messung} = 0,136$ W/m²K, $\Lambda_{dyn, Nennwerte} = 0,143$ W/m²K). Unter Annahme der oben angenäherten 0,044 W/mK für die feuchteunabhängige Wärmeleitfähigkeit der Strohdämmung werden bei der Variante mit WF WDVS (N 2.5, Abbildung 65) die Wärmeströme etwas überschätzt. Es ist anzunehmen, dass die Ursache dafür im produktfremden Datensatz liegt, der die Sorptionsvorgänge im Material nicht realistisch beschreibt. Wie bereits in Bezug auf die Schafwollvarianten (Abbildung 62, Abbildung 63) beschrieben, wirken sich Ungenauigkeiten in der Sorptionsisotherme auf die simulierten Latentwärmeeffekte und dessen Energiebilanz aus. Um die Latentwärmeeffekte realistisch zu quantifizieren, wäre ein produktspezifischer Datensatz inkl. der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit und Sorptionsisotherme notwendig.

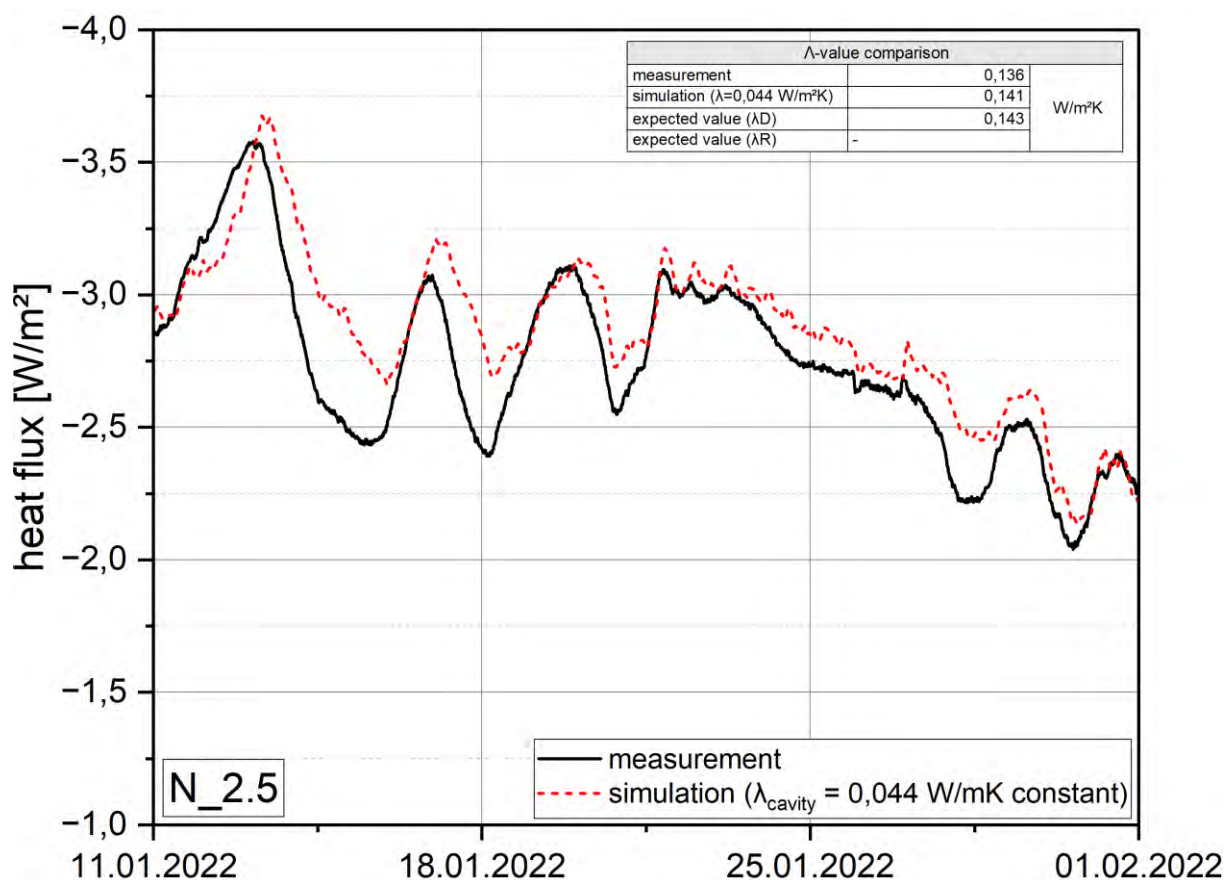


Abbildung 65: Abgleich zwischen den gemessenen und simulierten Wärmeströmen (24h Mittelwert, gleitend) des Aufbaus mit Stroheinblasdämmung und EPS WDVS (N 1.5). Tabellarische Auflistung der durchschnittlichen dynamischen Wärmedurchlasskoeffizienten (λ_{dyn}) im Mess- bzw. Simulationszeitraum sowie deren für den betrachteten Zeitraum berechneten Erwartungswert auf Basis der Herstellerangaben zum Nennwert (λ_D) der Dämmstoffe.

Zusammenfassung in-situ Wärmestrommessungen

Die hygrothermische Nachsimulation der Messungen zeigte für die Fälle, bei denen die hygrothermischen Daten hinreichend genau bekannt waren, jeweils eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Wärmeströmen. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass der feuchtegehaltsbedingte Anstieg der Wärmeleitfähigkeit bei den im Einbauzustand überwiegend auftretenden relativen Feuchten bis etwa 95 % r.F. nur gering ausfällt. Erst bei höheren Feuchten oder Kondensatbildung wird der Einfluss v.a. durch Latentwärmeeffekte deutlich größer

Bei den untersuchten Zellulosevarianten wurden deutlich höhere Wärmeströme gemessen, als die technischen Spezifikationen erwarten lassen. Eine anschließende Einblasdichtemessung zeigte eine deutliche Überschreitung der zulässigen Kompressionsdichte. Neben eventuellen Latentwärmeeffekten ist der hohe Anstieg mit hoher Sicherheit darauf zurückzuführen. Hier wird nochmals die Wichtigkeit der Einhaltung der entsprechenden Zulassungsbeschränkungen für die Einblasdichte deutlich.

Die Stroheinblasdämmung zeigte deutlich niedrigere Wärmeströme (- 5 % bis - 7 %), als die vom Hersteller zur Verfügung gestellten technischen Kennwerte vermuten lassen würden. Ob diese Werte vom Hersteller mit erhöhter Sicherheit deklariert wurden, ist nicht bekannt. Trotzdem deutet das Ergebnis darauf hin, dass das Potential dieser Dämmstoffe noch nicht ausgeschöpft ist.

In Tabelle 5 sind die in Abbildung 56 bis Abbildung 65 dargestellten Abweichungen zwischen Messung und Erwartungswerten zusammenfassend gegenübergestellt. Es ist klar ersichtlich, dass in den meisten Fällen mit Ausnahme der Strohvarianten die gemessenen Wärmedurchlasskoeffizienten ($\Lambda_{\text{dyn, Messung}}$) über den auf Basis des Wärmeleitfähigkeitsnennwerts errechneten Wärmedurchlasskoeffizienten ($\Lambda_{\text{dyn, Nennwert}}$) liegen. Dabei liegen die relativen Abweichungen für die Gefachdämmstoffe in einem Bereich zwischen etwa 4 % und 20 %. Die überproportional hohe Abweichung bei den Zellulosevarianten wird v.a. auf die bei den gemessenen Varianten deutlich zu hohe Einblasdichte zurückgeführt. Betrachtet man die übrigen Fälle, so deuten die Abweichungen darauf hin, dass ein Zuschlag von 5 % auf den Nennwert für Holzfaserdämmstoffen nach DIN 4108-4 im Jahresmittel vermutlich nicht überzogen ist. Die vorliegenden Ergebnisse deuten sogar darauf hin, dass für die rein thermische Bemessung ggf. auch ein Zuschlag zwischen 5 % und 10 % bei Naturfaserdämmstoffen gerechtfertigt sein könnte. Ein pauschaler Feuchtezuschlag auf pflanzliche Faserdämmstoffe von 20 %, wie er in der ÖNORM B 6015-2 angesetzt wird, ist hingegen deutlich zu hoch angesetzt.

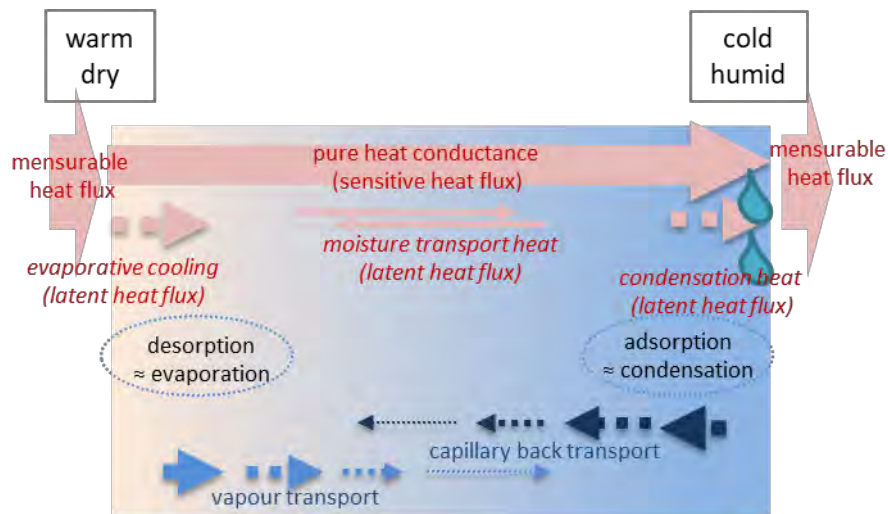
Tabelle 5: Zusammenfassende Gegenüberstellung der aus den Wärmestrommessungen im Zeitraum zwischen dem 11.01.2022 und dem 01.02.2022 hervorgehenden, durchschnittlichen Wärmedurchlasskoeffizienten Λ der verschiedenen Varianten im Vergleich zu dessen auf Basis der in den technischen Produktdatenblättern hinterlegten Nennwerten berechneten Erwartungswerten.

Variante		Messung Λ ($\Lambda_{\text{dyn, Messung}}$)	Erwartungswert Λ ($\Lambda_{\text{dyn, Nennwert - Basis } \lambda_D}$) (Herstellerangabe)	Abweichung
Gefachdämmung	WDVS			
Mineralwolle	EPS	0,101	0,098	+ 3,0 %
Mineralwolle	WF	0,110	0,101	+ 8,2 %
Holzfaser	EPS	0,118	0,109	+ 7,6 %
Holzfaser	WF	0,123	0,112	+ 8,9 %
Zellulose	EPS	0,129	0,107	+ 17,1 %
Zellulose	WF	0,139	0,110	+ 20,9 %
Schafwolle	EPS	0,124	0,111	+ 10,5 %
Schafwolle	WF	0,119	0,114	+ 4,2 %
Stroh	EPS	0,129	0,138	- 7,0 %
Stroh	WF	0,136	0,143	- 5,2 %

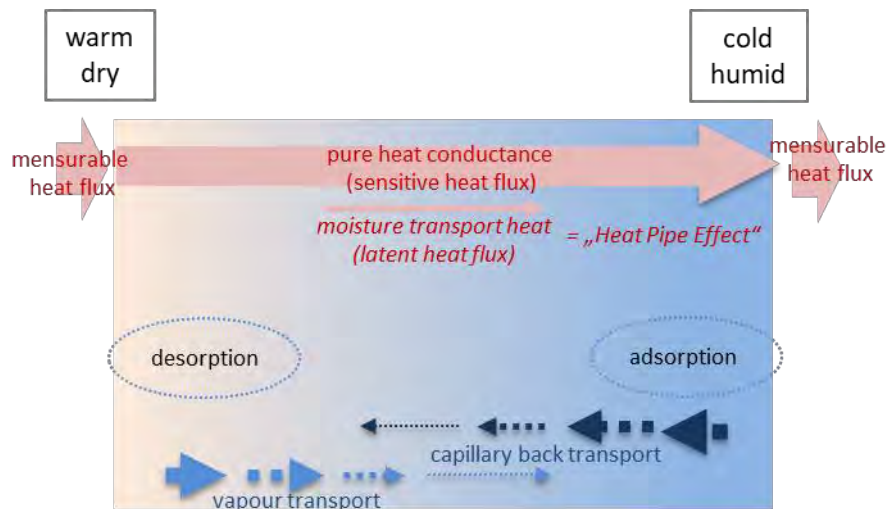
4.3 Labormessungen zur feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit (WLF)

4.3.1 Zielstellung und Voruntersuchungen mit hygrothermischer Simulation mit WUFI®

Ziel der Labormessungen ist es, entweder ein Prüfzenario zu identifizieren, das direkt für die praktische Anwendung verwendbare und realistische Wärmeleitfähigkeitswerte liefert oder das in Kombination mit hygrothermischen Simulationen indirekt die messtechnische Grundlage für solche Werte zur Verfügung stellt. Um den Laboraufwand zu begrenzen, werden daher zunächst einige Voruntersuchungen durchgeführt, um weniger geeignete Vorgehensweisen bereits im Vorfeld auszuschließen. Beim Laborversuch sollte Kondensation möglichst vermieden werden, da unter diesen Bedingungen so lange Feuchte umverteilt wird, bis der Dampfdruck im Probekörper auf ein Niveau gesunken ist, bei dem auf der Kaltseite kein Tauwasser mehr entsteht. Allerdings findet bei sorptionsfähigen, kapillaraktiven Dämmstoffen auch dann ein Latentwärmetransport statt, wenn keine Kondensation auftritt und das Feuchteprofil eingeschwungen ist. Dies liegt daran, dass oberhalb von etwa 75 % bis 80 % r.F. in den Fasern bzw. Poren der Materialien Flüssigtransport einsetzt. Da der Flüssigtransport immer in Richtung des geringeren Feuchtegehalts verläuft, ist er im Temperaturgefälle dem Dampftransport entgegengerichtet, d.h. er transportiert das Wasser von der feuchteren, kalten Seite teilweise zurück zur trockeneren, warmen Seite. Dieser im eingeschwungenen Zustand auftretende permanente Transport von Dampf von warm nach kalt und Flüssigwasser, zurück von kalt nach warm wird auch als „Heat-Pipe-Effekt“ bezeichnet. In der einen Richtung tritt dabei Wärmetransport durch Desorption (Verdunstung) und Adsorption (Kondensation unterhalb des Sättigungsdampfdrucks) auf, in der anderen Richtung (beim Flüssigtransport) jedoch nicht oder nur in deutlich geringerem Umfang. Abbildung 66 zeigt die Wärme- und Feuchteströme oben während der Umverteilungsphase (entspricht „Phase A“ in Abbildung 68) und unten im eingeschwungenen Zustand („Phase C“) bei einer Wärmeleitfähigkeit-Messung mit Tauwasserbildung schematisch dargestellt. Das Vermeiden von Tauwasser verkürzt dementsprechend die Einschwingphase.



Phase A (dynamic)



Phase C (steady state)

Abbildung 66: Schematische Darstellung von Wärme- und Feuchtetransport in der anfänglichen Feuchteumverteilungsphase (oben, entspricht „Phase A“ nach ISO 10051) und im eingeschwungenen Endzustand (unten, „Phase C“) bei der Wärmeleitfähigkeit-Messung eines Materials.

Der Großteil der Latentwärmeströme kann also durch Vermeiden von relativen Feuchten von nahe 100 % auf der Kaltseite der Probe vermieden werden, während der kleinere, durch den Heat-Pipe-Effekt bedingte Anteil sowohl im Labor als auch im Einbauzustand unvermeidbar ist. Bei den untersuchten Laborversuchsvarianten wird daher basierend auf Vorberechnungen ein geringer Temperaturgradient von 1 K pro cm (hier 10 K für die 10 cm dicke Platte) gewählt, um mit Vorkonditionierung der Probekörper bei 80 % r.F. keine Kondensation zu ermöglichen und die Dauer des Versuchs bis zum Erreichen des eingeschwungenen Zustands zu begrenzen. Die Temperaturen an den beiden Oberflächen werden konstant mit 5 °C und 15 °C ange-

nommen. Die Oberflächen sind dampfdicht, so dass kein Feuchteaustausch mit der Umgebung, sondern nur eine Umverteilung innerhalb des Probekörpers möglich ist. Die Anfangsfeuchte wird im Material homogen verteilt angenommen und beläuft sich auf 11,4 M.-%, was der Gleichgewichtsfeuchte bei 80 % r.F. und damit den Bedingungen bei der Vorkonditionierung entspricht. Die hygrothermischen Kennwerte für das betrachtete Holzfasermaterial wurden umfassend im hygrothermischen Labor des IBP gemessen. (s. Kapitel 4.5.1).

Eine in den letzten Jahren immer wieder angewandte Vorgehensweise bei der Messung sieht eine Aufteilung des Materials in einzelne Schichten vor, die mit dampfdichten Folien voneinander getrennt werden. Dies verhindert den Dampftransport über die Schichtgrenzen hinweg, wodurch die Feuchte nicht durch die gesamte Probe auf die Kaltseite transportiert werden und dort kondensieren kann. Da innerhalb der einzelnen Schichten nur geringe Temperaturdifferenzen auftreten, bleibt auch die Partialdruckunterschied geringer. Da die Methode besonders aufwändig ist, wird sie mit Hilfe hygrothermischer Simulation überprüft und mit der Messung der ganzen Platte verglichen.

Um die Größenordnung des verbleibenden Latentwärmeanteils zu quantifizieren, wird zunächst die Messung der ganzen Platte mit 10 cm Dicke simuliert. Normalerweise wird bei der hygrothermischen Simulation mit der Software WUFI® [43] bei Verdunstung oder Desorption an der jeweiligen Position die Verdunstungswärme von 2500 kJ/kg (bezogen auf die verdunstete Feuchtemenge) entzogen und an der Position, an der dann Kondensation oder Absorption stattfindet, die entsprechende Wärmemenge wieder zugeführt. Zu analytischen Zwecken kann dieser Latentwärmehtransport in der Simulation aber auch deaktiviert werden – d.h. die Feuchteumverteilung wird in der Feuchtebilanz unverändert berechnet, die Einflüsse auf die Wärmebilanz werden aber nicht berücksichtigt.

Feuchte- und Temperaturprofil der Simulation der ganzen Platte sind in Abbildung 67 links dargestellt. Die relative Feuchte steigt auf der Kaltseite auf maximal 92 %, es tritt also kein Tauwasser auf. Bei Simulation „mit“ Latentwärme ergibt sich im eingeschwungenen Zustand eine effektive Wärmeleitfähigkeit der ganzen Platte von 0,0389 W/mK, während dieser Wert bei Berechnung „ohne“ Latentwärme auf 0,0387 W/mK sinkt. Die Differenz von 0,0002 W/mK wäre dementsprechend auf die Latentwärmeeffekte, bzw. da keine Kondensation auf der Kaltseite des Probekörpers auftritt, auf den Heat-Pipe-Effekt zurückzuführen. Die Wärmeleitfähigkeit wurde bei der Vorberechnung für die Labormessung zunächst noch den Herstellerangaben entnommen. Bei den in Abbildung 67 dargestellten und hier beschriebenen Berechnungsergebnissen wurde dagegen bereits die finale Lösung (s. Kapitel 4.5.3) mit der feuchtabhängigen Wärmeleitfähigkeit verwendet und neu simuliert.

In Abbildung 67 rechts sind die berechneten Temperatur- und Feuchteprofile nach dem Erreichen des eingeschwungenen Zustandes für die einzelnen 20 mm dicken und durch Folien getrennten Schichten dargestellt. Während die relative Feuchte in der ganzen Platte von ca. 62 % auf der Warmseite bis auf 92 % auf der Kaltseite steigt, bleibt die Bandbreite in den

dampfdicht getrennten Schichten mit Werten von ca. 77 bis 86 % r.F. erwartungsgemäß deutlich geringer.

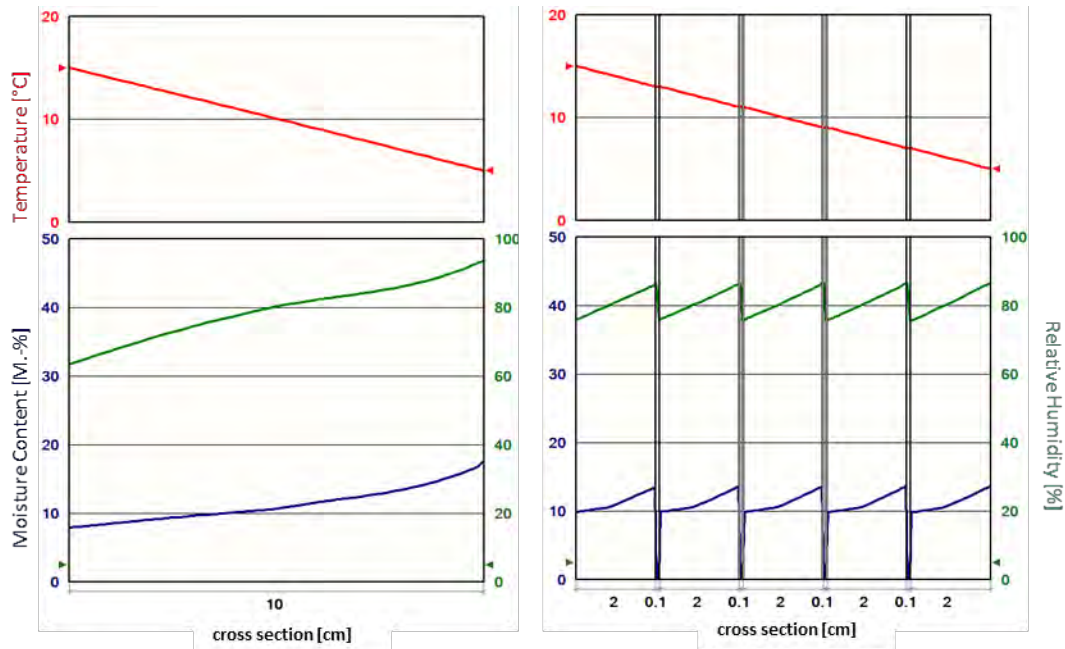


Abbildung 67: Berechnete Profile von Temperatur (rot), relativer Feuchte (grün) und Wassergehalt (blau) in einem Holzfaserdämmstoff im eingeschwungenen Zustand nach abgeschlossener Feuchteumverteilung bei Randbedingungen entsprechend dem Wärmeleitfähigkeitsversuch. Links Simulation des Versuchs an der ganzen Platte, rechts an der geschichteten Platte mit dampfdichter Folie zwischen den einzelnen Schichten.

Die Auswertung der effektiven WLF ergibt bei Simulation mit Latentwärme nun nur noch einen Wert von 0,0388 W/mK statt ohne Folientrennung von 0,0389 W/mK, während der Wert ohne Latentwärme wie zuvor bei 0,0387 W/mK liegt. Die verbleibende Erhöhung des Wärmetransports durch den Heat-Pipe-Effekt kann somit von 0,0002 auf 0,0001 W/mK verringert, aber immer noch nicht vollständig eliminiert werden. Die Verbesserung wird zudem dadurch eingeschränkt, dass auch das Feuchteniveau auf der Kaltseite etwa 18 M.-% erreicht, während es an den Rändern der Einzelschichten maximal auf knapp 14 M.-% steigt. Ein Teil der höheren effektiven Wärmeleitfähigkeit bei der Messung der Gesamtplatte könnte also auch auf die nicht lineare Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit bei diesem höheren Wassergehalt zurückzuführen sein.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass bei geeigneter Wahl von Vorkonditionierung und Temperaturgradient bei der WLF-Messung die verbleibenden Latentwärmeeffekte sehr gering und mit maximal 0,5 % deutlich unter der Messgenauigkeitsgrenze der Wärmeleitfähigkeitsmessung (standardmäßig 2 - 3 %) bleiben. Die aufwändige Vorgehensweise der Messung mit dampfdicht getrennten Schichten kann zwar bei optimistischer Annahme den Latentwärmeeinfluss halbieren, aber auch nicht vollständig eliminieren. Dieses Messverfahren wird daher

im Folgenden nicht verwendet. Stattdessen werden die Messungen an ganzen und geschichteten Platten durchgeführt, wobei die Einzelschichten mit Temperaturmessung an den Schichtgrenzen den Vorteil haben, dass hier ggf. unterschiedlich hohe Wärmeleitfähigkeiten mit den nach der Messung jeweils ermittelten Wassergehalten der Teilschichten korreliert werden, können.

4.3.2 Messverfahren

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit für den Wärmeschutz im Gebäude erfolgt gemäß DIN 4108-4 nach DIN EN 12664 [44]. Die DIN EN 12664 beinhaltet das Verfahren gemäß ISO 10051 [45] für die Messung von feuchten Proben. Grundsätzlich handelt es sich bei der Plattengerätmessung um ein direktes statisches Messverfahren, bei dem ein Temperaturgradient zwischen Warm- und Kaltseite aufgebracht wird. Dieser Gradient wird konstant gehalten bis alle Aufwärm- bzw. Speichervorgänge abgeschlossen sind und sich ein konstanter Wärmestrom einstellt. Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit erfolgt dann aus dem gemessenen Wärmestrom in Beharrung und der dabei gemessenen Temperaturdifferenz und wird auf die Dicke des Probekörpers bezogen. Solange der Probekörper trocken oder diffusionsdicht ist, stellt sich je nach Probekörper innerhalb von 4 h bis 24 h der Beharrungszustand ein und die Messung kann ausgewertet werden. Bei feuchten Proben kommt es aber wie oben beschrieben zu verschiedenen Feuchtetransportvorgängen in der Probe, die das thermische Verhalten u.U. deutlich beeinflussen. Das Verfahren nach ISO 10051 sieht vor, dass die Messung entweder am Anfang ausgewertet wird, bevor die Transportvorgänge für die Feuchte beginnen (Phase A in Abbildung 68) oder nachdem der Transport vollständig abgeschlossen ist und sich ein stabiler Zustand einstellt (Phase C).

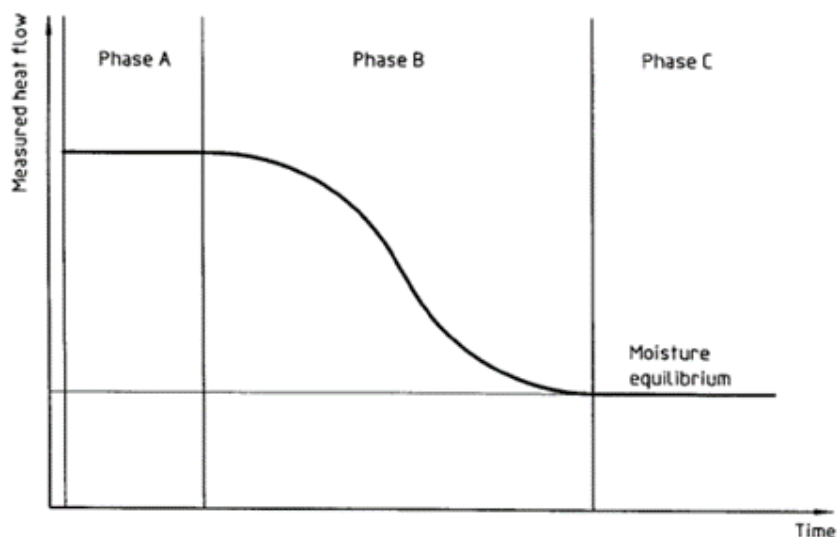


Abbildung 68: Phasenverlauf bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in feuchten Proben Quelle: ISO 10051.

Aus früheren Messungen am Fraunhofer-IBP ist bereits bekannt, dass bei nachwachsenden Rohstoffen wie Holzfasern, die sich durch eine hohe Ausgleichsfeuchte und geringen Diffusionswiderstand auszeichnen, keine Auswertung im Bereich der Phase A möglich ist. Das bestätigt die theoretischen Überlegungen im vorherigen Kapitel. Der Feuchtetransport setzt unmittelbar mit dem Aufbringen eines Temperaturgradienten ein. Daher muss die Auswertung der Messung in Phase C erfolgen, wenn die Umlagerungsprozesse abgeschlossen sind. Bis der Wärmestrom stabil ist, kann es unter Umständen lange dauern, so dass die übliche Messdauer im Plattengerät von weniger als 24 h auf mehrere Tage oder sogar Wochen ausgedehnt werden muss. Gemäß EN 12664 A.3.11 gilt die Messung als „in Beharrung“, wenn innerhalb einer Messperiode sich der Wert der Wärmeleitfähigkeit um nicht mehr als 1,0 % ändert. Die Messperiode muss anhand der Probendicke, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität gem. der Norm bestimmt werden und liegt für eine Holzfaserverplatte mit 100 mm Dicke bei ca. 24 h. Somit darf hier die Änderung der Wärmeleitfähigkeit innerhalb von 24 h nicht größer als 1,0 % sein, damit die Messung ausgewertet werden kann. Zudem darf die Wärmeleitfähigkeit nicht monoton fallend sein. In der Probe wird sich dabei ein Gradient der Feuchteverteilung vom höheren zum niedrigeren Partialdruck einstellen. Der Teil der Probe, der zur Warmseite zeigt, wird aufgrund des dort höheren Partialdrucks trockener, der Teil der Probe an der Kaltseite feuchter. Je nach Ausgleichsfeuchte des Probekörpers und Temperatur an der Kaltseite kann es auch zu Kondensation kommen und Wasser in flüssiger Form im Probekörper auftreten. Um die Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen, sieht die ISO 10051 vor, dass die Proben in besonderer Weise vorbereitet werden: Der Probekörper wird vor der Messung in Einzelschichten gleicher Dicke geschnitten. Zwischen jeder Scheibe wird ein zusätzlicher Temperatursensor platziert. Die Masse der Einzelschichten wird vor und nach der Messung sowie im Trockenzustand bestimmt. Aus diesen Daten wird der Feuchtegehalt jeder einzelnen Probenscheibe bestimmt. Mit den zusätzlichen Temperatursensoren lässt sich auf Grund des konstanten Wärmestroms die Wärmeleitfähigkeit für jede Schicht einzeln ermitteln. Auf dieser Basis kann die Wärmeleitfähigkeit für jede Schicht in Abhängigkeit des jeweiligen Feuchtegehalts bestimmt werden.

4.3.2.1 Verwendete Messgeräte

Die Labormessungen zur feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit wurden im Labor des Fraunhofer-IBP in Stuttgart durchgeführt. Die Messungen an den feuchten Proben erfolgten in einem Plattengerät vom Typ Netzsch-Taurus TLP 900 mit geschützter Heizplatte und Gradientenschutz mit einer Messfläche von 50 cm x 50 cm und Schutzring von 20 cm (Heizplatte 90 cm x 90 cm). Das Gerät kann sowohl als Ein- als auch als Zweiplattengerät verwendet werden. Der Probeneinbau ist horizontal, die Wärmestromrichtung somit vertikal ausgerichtet. Als Temperatursensoren werden Thermoelemente mit 0,5 mm Durchmesser direkt auf die Probe platziert. Für die Messungen, an den in Einzelschichten aufgetrennten Probekörpern, wurde die Apparatur mit zusätzlicher Messtechnik ausgestattet. Es kam ein Multiplexer der Firma Agilent mit zusätzlichen Thermoelementen mit 0,2 mm Durchmesser zum Einsatz. Anstatt die interne

Referenztemperatur im Multiplexer zu verwenden, wurde die Präzision der Temperaturmessung durch die Verwendung einer elektronischen Eisstelle optimiert. Die dünnen Thermoelemente mit nur 0,2 mm Dicke ermöglichen eine Messung der Temperatur in den Zwischenschichten bei minimalem Wärmestrom in Querrichtung und geringer Verformung der Oberflächen. Für Vergleichsmessungen an den trockenen Proben wurde ein Plattengerät vom Typ GHP-Titan der gleichen Firma eingesetzt. Das Gerät hat eine Messfläche von 15 cm x 15 cm bei einer Heizplatte von 30 cm x 30 cm.

4.3.2.2 Fehlerbetrachtung

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach DIN EN 12664 im Plattengerät mit geschützter Heizplatte ist ein direktes Messverfahren. Laut EN 12664 ist die erwartete Messgenauigkeit mit 2 % des Messwertes (Anhang B 1.5.3 in EN 12664) anzunehmen. Zu dieser Messunsicherheit kommt bei dem Verfahren nach ISO 10051 mit zusätzlichen Temperatursensoren an den Schichtgrenzen des aufgeteilten Probekörpers, ein nicht zu vernachlässigender Unsicherheitsbetrag hinzu. Für eine Schichtdicke von 20 mm und einen Temperaturgradienten von 1 K / cm ergibt sich für jede Schicht ein Temperaturgradient von 2 K. Die Thermoelemente haben eine Genauigkeit von $\pm 0,1$ K. Die Dicke der Proben lässt sich materialbedingt auf etwa 0,2 mm genau einstellen und bestimmen. Kombiniert muss in der Summe mit einer Messunsicherheit von ca. 3 % – 4 % vom Messwert gerechnet werden.

4.3.3 Durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse

4.3.3.1 Verwendete Materialien und Probenvorbereitung

Für die Labormessungen wurde eine im Trockenverfahren hergestellte Holzfaserdämmung mit einer Nennrohichte von 110 kg/m^3 verwendet. Die Dämmplatte ist mit der deklarierten Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ von 3,0 als diffusionsoffen einzustufen. Die Platten werden in den Abmessungen von Länge 1000 mm x Breite 400 mm x Dicke 100 mm geliefert. Da das verwendete Plattengerät eine Messfläche von 500 mm Breite aufweist, muss der Probekörper aus mehreren Teilen zusammengesetzt werden, um die Messfläche abzudecken. Um die Anzahl der Schnittflächen in der Messfläche zu minimieren, wurden die Proben aus 2 Platten a 800 mm x 400 mm zusammengesetzt. Der freistehende Teil der Heizplatte von 50 mm Breite wurde mit einem Schutzring aus EPS gleicher Dicke abgedeckt. Der Einfluss des zusammengesetzten Probekörpers auf den Messwert wurde kontrolliert, indem eine kleinere Probe mit 300 mm x 300 mm in einem kleinen Plattengerät gemessen wurde. Die reale Dichte der gelieferten Platten lag zwischen 85 kg/m^3 und 115 kg/m^3 . Der Einfluss der Dichte wurde berücksichtigt, indem die Proben so ausgewählt wurden, dass Proben mit einer möglichst ähnlichen Dichte gemessen wurden.

Für die Messung nach ISO 10051 wurde ein Satz von Proben aufgetrennt, um Schichten mit 20 mm Dicke zu erzeugen. Die Platten wurden mit einer Bandsäge auf 25 mm Dicke zugeschnitten und mit einer Dickenschleifmaschine auf einheitlich 20 mm planparallel geschliffen.

Die Schichten wurden dann so ausgewählt, dass eine möglichst gleichmäßige Dichteverteilung erreicht wird.

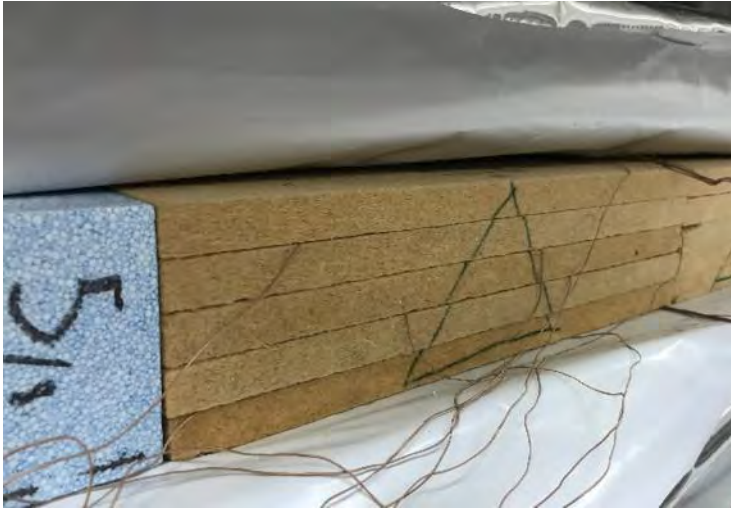


Abbildung 69: Aufgetrennter Probekörper eingebaut im Plattengerät mit Thermoelementen zwischen den Schichten. Die Seiten sind mit EPS gedämmt. Der ganze Probekörper wird allseitig mit einer Dampfsperre versiegelt.

Für die Messungen im trockenen Zustand wurden die Proben bei 70 °C getrocknet. Die Befeuchtung der Proben erfolgte in einer Klimakammer bei 23 °C und 70 % bzw. 80 % rel. Luftfeuchte. Um eine Austrocknung der Proben während der Messung im Plattengerät zu vermeiden, wurden die Proben in einer mit Aluminium beschichteten Dampfsperre eingewickelt und versiegelt.

4.3.3.2 Übersicht der durchgeführten Messungen

Es wurden folgende Messungen durchgeführt. Die Temperaturdifferenz zwischen der Kühl- und der Heizplatten betrug immer 20 K für Trockenmessungen und 10 K bei Messungen im feuchten Zustand:

Trockenmessung:

- Ganze Platten, Dicke 100 mm, L 400 mm x W 800 mm, Mitteltemperatur 0 °C bis 20 °C
- Halbierte Platten, Dicke 50 mm, L 300 mm x W 300 mm Mitteltemperatur 10 °C
- Platten aufgetrennt in Einzelschichten à 20 mm, gesamte Dicke 100 mm, L 400 mm x W 800 mm, Temperatur 0 °C bis 20 °C

Feuchte Messungen:

- Ganze Platten, Dicke 100 mm, L 400 mm x W 800 mm, Mitteltemperatur 10 °C, Feuchtegehalt 9,1 M.-% Messdauer 120 h
- Ganze Platten, Dicke 100 mm, L 400 mm x W 800 mm, Mitteltemperatur 10 °C, Feuchtegehalt 11,6 M.-% Messdauer 250 h

- Platten aufgetrennt in Einzelschichten à 20 mm, gesamte Dicke 100 mm, L 400 mm x W 800 mm, Mitteltemperatur 10 °C, Feuchtegehalt 8,7 M.-% Messdauer 120 h
- Platten aufgetrennt in Einzelschichten à 20 mm, L 400 mm x W 800 mm, Temperatur 10 °C, Feuchtegehalt 11,8 M.-% Messdauer 250 h

Die Ergebnisse der Messungen werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

4.3.3.3 Messungen an trockenen Proben

Die Wärmeleitfähigkeit nach Trocknung bei 70°C wurde für verschiedene Mitteltemperaturen zwischen 0 °C und 20 °C ermittelt. Bei allen porösen Stoffen nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Probenmitteltemperatur zu. Die Zunahme liegt im Wesentlichen in der höheren Mobilität der Gas- bzw. Luftmoleküle im Porenraum begründet. In Abbildung 70 sind die Ergebnisse für den Probekörper aus fünf zusammengesetzten Schichten à 20 mm und dem Probekörper aus der Probe in Lieferdicke mit 100 mm aufgeführt. Die Messwerte für beide Proben liegen nahe beieinander. Das Aufteilen der Proben hat also keinen signifikanten Einfluss auf die gemessene Wärmeleitfähigkeit. Durch Mittelwertbildung über alle Messdaten ergibt sich bei 10 °C eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10} = 0,0380 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und ein Temperaturkoeffizient (Anstieg mit der Probenmitteltemperatur) für die Wärmeleitfähigkeit von $0,089 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K}) /\text{K}$. Die Dichte der gemessenen Platten beträgt im Mittel $111 \text{ kg}/\text{m}^3$ für die ganzen Platten und $104 \text{ kg}/\text{m}^3$ für die in Einzelschichten aufgetrennten Platten.

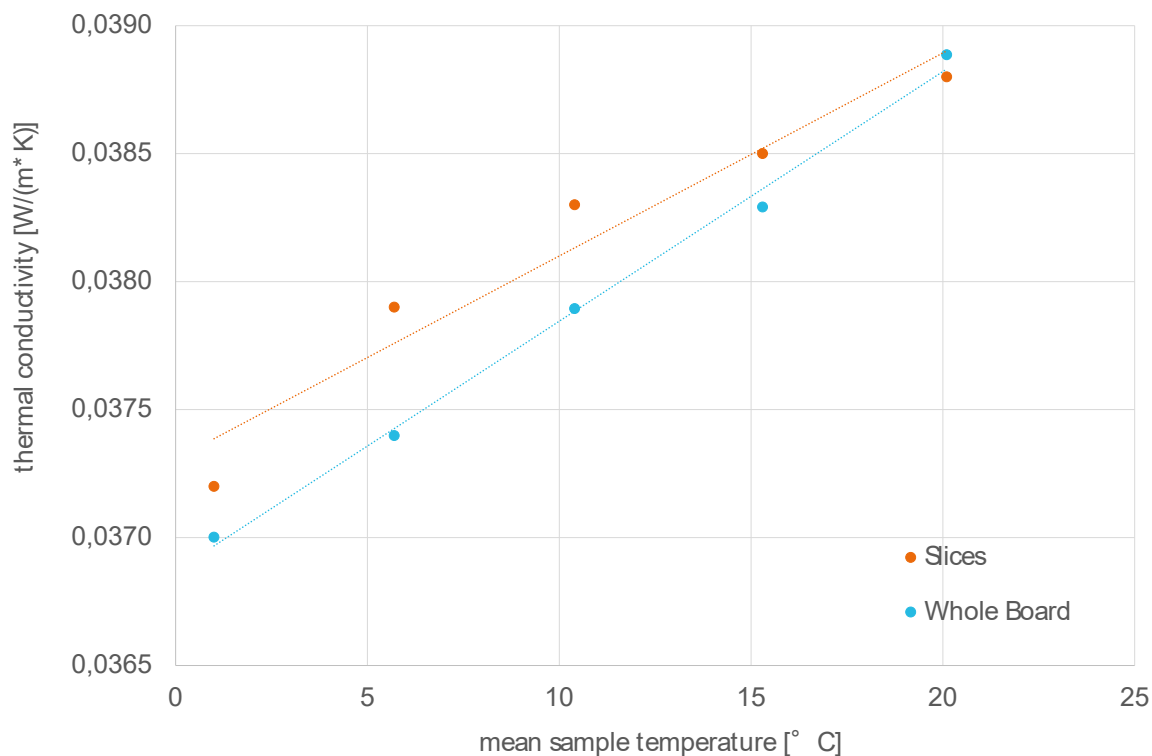


Abbildung 70: Gemessene Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der trockenen Proben als einzelne Messpunkte und lineare Regressionsgraden für die komplette und die geschichtete Platte jeweils mit Angabe der mathematischen Gleichung.

Um sicher zu gehen, dass die Messung der Platten zusammengesetzt aus zwei Teilen à 400 mm nicht zu einer großen Beeinflussung der Wärmeleitfähigkeit führt wurde noch eine weitere Messung an Proben in einem kleinen Plattengerät durchgeführt. Hier kann eine Probe mit 300 mm x 300 mm Grundfläche und bis zu 70 mm Dicke gemessen werden. Aus den Platten wurden jeweils Proben mit der größten und kleinsten Dichte ausgewählt. Die Proben wurden auf 300 mm x 300 mm zugeschnitten und in der Mitte halbiert. So ergeben sich zwei Probekörper mit je 50 mm Höhe. Die Wärmeleitfähigkeit (jeweils bei 10 °C Probemitteltemperatur) betrug 0,0359 W/(m·K) bei einer Rohdichte von 88,8 kg/m³ und 0,0378 W/(m·K) bei einer Rohdichte von 112,4 kg/m³.

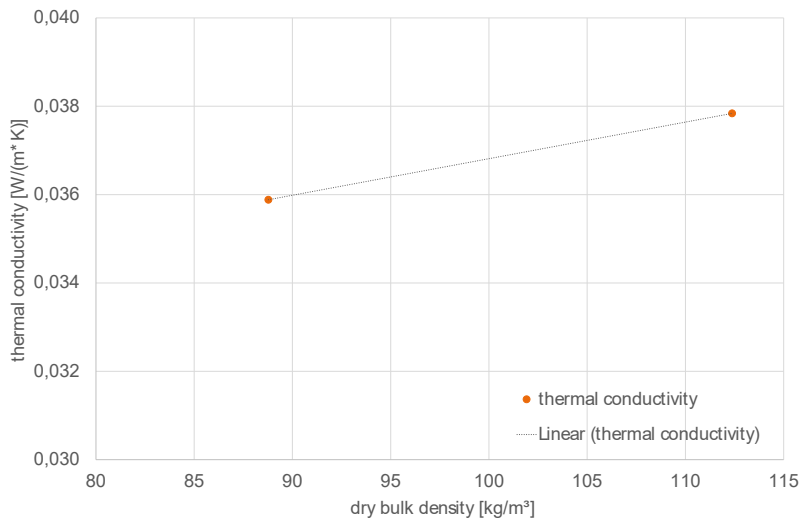


Abbildung 71: Wärmeleitfähigkeit bei 10 °C in Abhängigkeit von der Rohdichte (kleine Probekörper mit 50 mm Dicke)

Für die weitere Auswertung wird daher wie oben geschrieben der mittlere Wert aller Messdaten von 0,0380 W/(m·K) als Bezugswert für die Wärmeleitfähigkeit trocken herangezogen.

In Tabelle 6 sind Details zur Messung des Probekörpers in einzelnen Schichten aufgeführt.

Tabelle 6: Rohdichte, Mitteltemperatur und Messwert der trockenen Wärmeleitfähigkeit an zwei in 20 mm dicke Einzelschichten aufgeteilten Probekörpern mit der Heizplatte in der Mitte. Mittelwert für beide Proben: WLF= 0,0383 W/(m·K) bei 10,4 °C Probenmitteltemperatur

Schicht	Rohdichte, trocken	Mitteltemperatur	Wärmeleitfähigkeit
	kg/m ³	°C	W/(m·K)
Kühlplatte			
1	117	6,3	0,0374
2	100	8,4	0,0372
3	93	10,5	0,0374
4	108	12,5	0,0381
5	112	14,5	0,0386
Heizplatte			
1	105	14,5	0,0400
2	102	12,6	0,0379
3	92	10,5	0,0382
4	100	8,5	0,0370
5	113	6,4	0,0376
Kühlplatte			

4.3.3.4 Feuchtmessungen

Wie oben beschrieben, wurden die Proben vor der Messung in einer Klimakammer bei 23 °C und 70 % bzw. bei der zweiten Messung mit 80 % rel. Feuchte konditioniert. Die Proben wurden in der Klimakammer bis zur Gewichtskonstanz gelagert. Unmittelbar nach der Entnahme aus dem Klimaschrank wurde die Masse bestimmt, die Proben in Folie wasserdampfdicht eingepackt und dann ins Plattengerät eingebaut. Die Temperierung des Plattengeräts wurde bereits vor dem Einbau gestartet, so dass die Zieltemperatur an der Probenoberfläche möglichst schnell erreicht ist.

In Abbildung 72 ist der zeitliche Verlauf der Oberflächentemperatur und der Wärmeleitfähigkeit in Minutenschritten für die ersten 24 h dargestellt. Die Temperaturen an den Oberflächen waren innerhalb von 5 h stabil. Die Wärmeleitfähigkeit schwankt in der Aufheizphase noch stark. Nachdem die Temperaturdifferenz konstant ist, erreicht der Wärmestrom ein Plateau und sinkt dann allmählich ab.

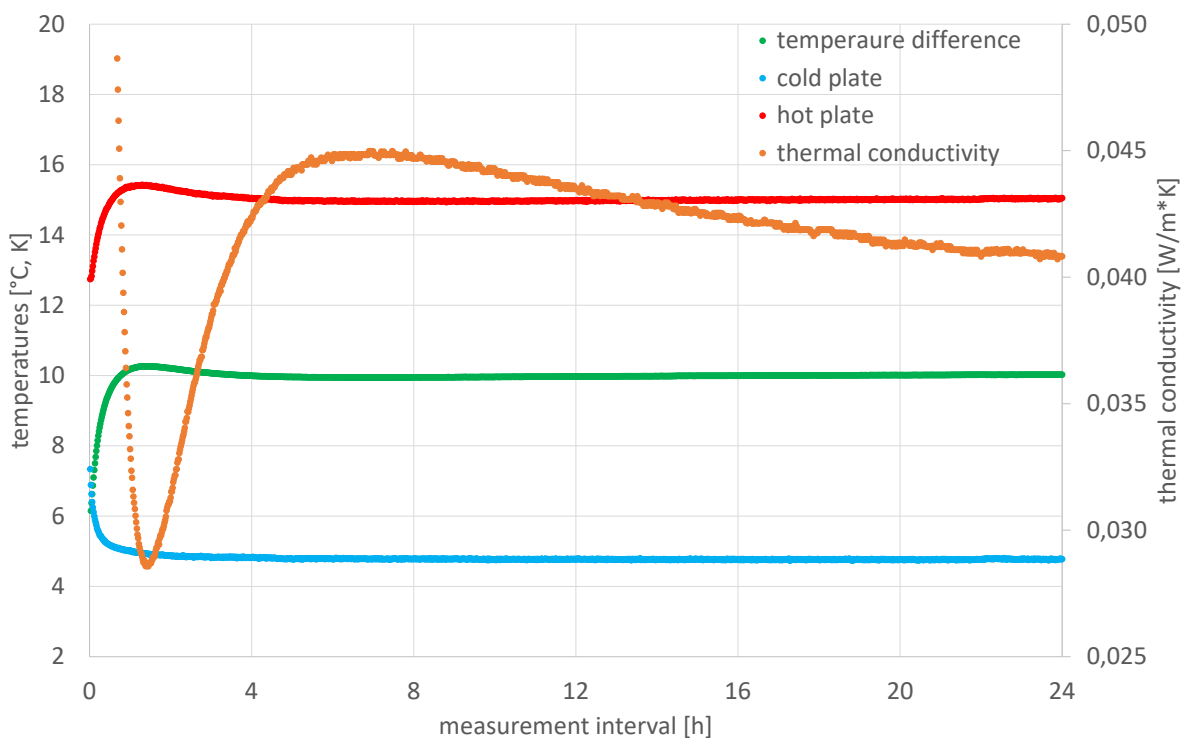


Abbildung 72: Gemessener zeitlicher Verlauf der Temperaturen an der Probenoberfläche und der mittleren Wärmeleitfähigkeit in den ersten 24 h. bei im Mittel 8,7 M.-% Feuchtegehalt am in Einzelschichten aufgeteilten Probekörper

Abbildung 70 zeigt die gleichen Messwerte wie Abbildung 69, jetzt aber über den gesamten Messzeitraum von 120 Stunden. Die Temperaturen bleiben ab etwa 5 bis 120 h konstant, während die Wärmeleitfähigkeit von 0,045 W/(m·K) auf am Ende 0,0382 W/(m·K) absinkt. Das liegt nahe am Trockenwert von 0,0380 W/(m·K).

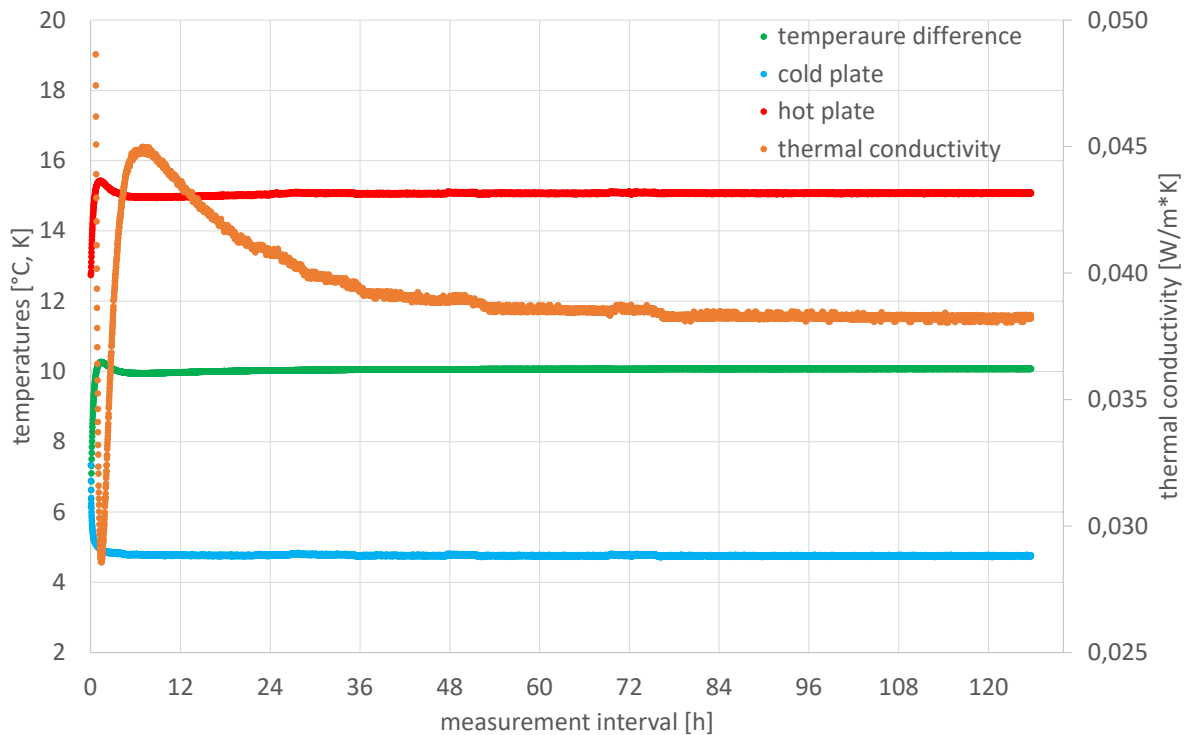


Abbildung 73: Gemessener zeitlicher Verlauf der Temperaturen an der Probenoberfläche und der mittleren Wärmeleitfähigkeit über die gesamte Messdauer von 120 h. bei im Mittel 8,7 M.-% Feuchtegehalt am in Einzelschichten aufgeteilten Probekörper

Als Abbruchkriterium bzw. Voraussetzung für eine Auswertung darf sich nach EN 12664 (s.o.) der Messwert, wie bereits eingangs erwähnt, innerhalb von einer Messperiode nicht um mehr als 1 % ändern und die Kurve nicht mehr monoton fallend sein. In Abbildung 74 sind die gemessene Wärmeleitfähigkeit und die Änderungsrate der Wärmeleitfähigkeit sowie der jeweilige 1%-Grenzwert für zwei verschiedene Feuchtehalte dargestellt.

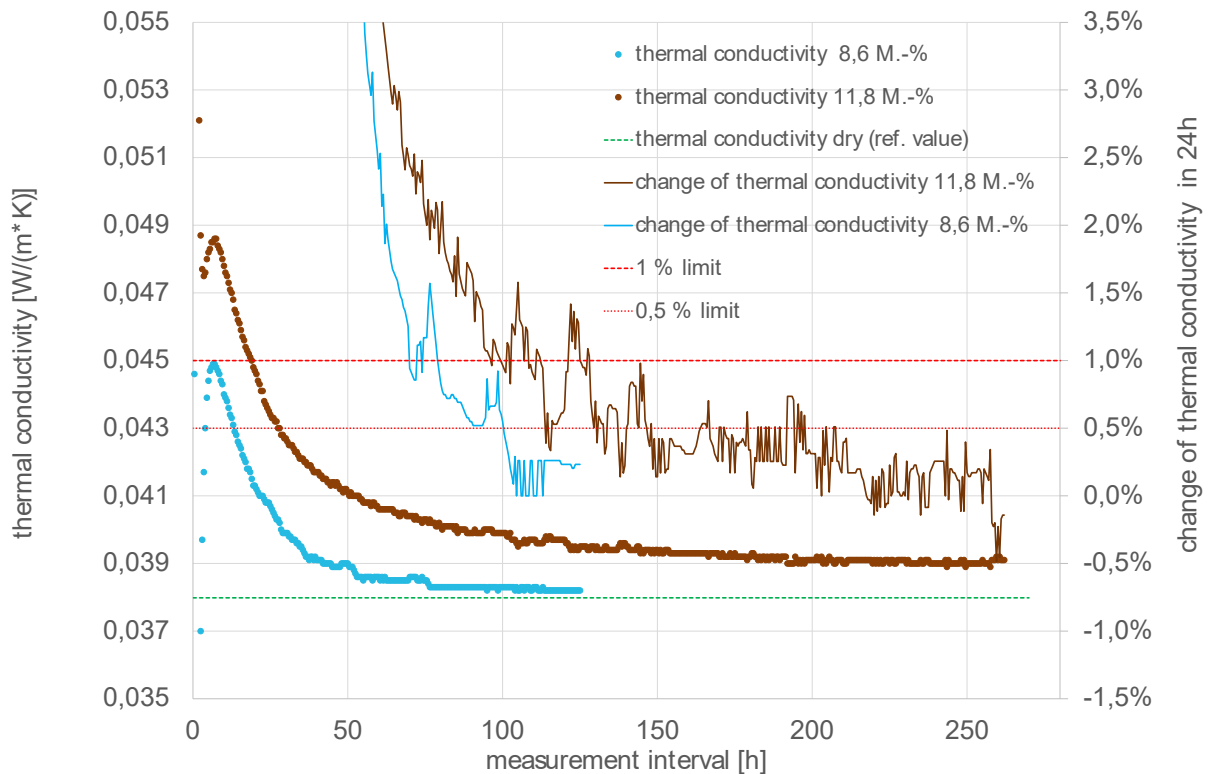


Abbildung 74: Zeitlicher Verlauf (dicke Linie) und Änderungsrate (dünne Linie) der Wärmeleitfähigkeit über 250 h. Messung der Wärmeleitfähigkeit bei 8,6 M.-% und 11,8 M.-% Feuchte im Plattengerät an Probekörper aufgeteilt in Schichten.

Das Abbruchkriterium von 1 % Änderung wird bereits nach 3 bzw. 4 Tagen erreicht. Da die Kurve aber immer noch monoton fallend ist, muss die Messung über etwa 5 bzw. 12 Tage weitergeführt werden. Ein früheres Abbrechen und Auswerten der Messung würden einen zu hohen Wert für die Wärmeleitfähigkeit ergeben. Die Endergebnisse der vier durchgeführten Messungen an feuchten Proben sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 7: Ergebnisse Wärmeleitfähigkeit feucht

Probe	Anordnung	Konditionierung	Messdauer	Feuchtegehalt [M.-%]	Wärmeleitfähigkeit in Beharrung [W/mK]
Ganze Platte 100 mm	Zweiplattenmessung	23°C-70%rF	120 h	8,8	0,0386
	Zweiplattenmessung	23°C-80%rF	250 h	11,6	0,0385
Zusammengesetz aus 5 Schichten a 20 mm	Zweiplattenmessung	23°C-70%rF	120 h	8,6	0,0382
	Einplattenmessung	23°C-80%rF	250 h	11,8	0,0390
Vergleichswert trockene Probe λ_{10}					0,0380

Die Wärmeleitfähigkeit hat bei den vergleichsweise geringen Feuchtegehalten in allen Fällen um maximal 1 mW/(m·K) bzw. 2,6 % bezogen auf den Trockenwert zugenommen. Entgegen der Erwartung liegt die gemessene Wärmeleitfähigkeit der ganzen Platte für die bei 80 % konditionierte Probe etwas unter dem Wert bei der 70 % konditionierten Probe. Die Ergebnisse zeigen also, dass die feuchtebedingte Zunahme bei Feuchtegehalten bis 80 % Luftfeuchte nur gering ausfallen. Bei der Bewertung der Ergebnisse sollte man gem. EN 12664 die Messunsicherheit von 2 % für Messungen im Plattengerät beachten. Die Steigerung der Wärmeleitfähigkeit durch die Feuchte im Probekörper ist in dem hier geprüften Material so gering, dass der Effekt zwischen 70 % r.F. und 80 % r.F. durch die allgemeine Streuung in der Messung weitgehend überlagert wird. Die Messung in Einzelschichten ergibt ähnliche Messwerte wie die Messung an der ganzen Platte.

4.3.3.5 Auswertung Verfahren nach ISO 10051 mit Einzelschichten

In dem vorhergehenden Kapitel erfolgte die Auswertung der Messung für die ganze Probe, also aus dem Wärmestrom und der Temperaturdifferenz von Kaltseite zu Warmseite über den ganzen Probekörper mit 100 mm Dicke. Nach ISO 10051 soll die Wärmeleitfähigkeit für jede einzelne Schicht (siehe Tabelle 6) bezogen auf den jeweiligen Feuchtegehalt am Ende der Messung bestimmt werden.

Gemäß ISO 10051 wurden die Proben direkt nach der Messung der Wärmeleitfähigkeit ausgebaut und der Feuchtegehalt jeder einzelnen Schicht ermittelt. Über die Temperatursensoren zwischen den Schichten und das resultierende Temperaturgefälle bei bekanntem Wärmestrom kann die Wärmeleitfähigkeit in jeder Schicht bestimmt werden. In Tabelle 8 und Tabelle 9 sind die Ergebnisse für die beiden Messungen zusammengefasst. Wie oben erläutert, steigt die Wärmeleitfähigkeit mit der Probenmitteltemperatur an. In jeder Schicht liegt also eine andere Probenmitteltemperatur vor. Daher muss, um die Ergebnisse vergleichbar zu machen, die gemessene Wärmeleitfähigkeit auf 10°C umgerechnet werden. Für die Umrechnung wurde der vorher in der Trockenmessung ermittelte Faktor 0,089 mW/(m·K) /K verwendet.

Tabelle 8: Auswertung einzelner Schichten gem. ISO 10051 - Wärmeleitfähigkeit nach 120 h, Feuchtegehalt 8,6 M.-%

Schicht	Trocken Rohdichte	Mitteltemp.	Wärmeleitfähigkeit umgerechnet auf 10 °C	Feuchtegehalt vor Messung	Feuchtegehalt nach Mes- sung	Masse Än- derung
	kg/m ³	°C	W/(m· K)	M.-%	M.-%	g
Kühlplatte						
1	117	5,8	0,0376	8,6%	9,5%	7.5
2	100	7,9	0,0376	8,6%	8,9%	2.3
3	93	10,0	0,0367	8,1%	8,0%	-0.5
4	108	12,1	0,0377	8,5%	7,8%	-5.6

5	112	14,1	0,0389	8,7%	7,2%	-10.8
Heizplatte						
1	105	14,1	0,0391	8,9%	7,5%	-10.0
2	102	12,1	0,0384	8,7%	8,0%	-5.2
3	92	10,0	0,0379	8,7%	8,6%	-1.0
4	100	8,0	0,0373	8,8%	9,1%	2.0
5	113	5,9	0,0378	8,5%	9,6%	8.2
Kühlplatte						

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse für jede Schicht aufgeführt. Wie erwartet, nimmt der Feuchtegehalt an den Kaltseiten zu und an den Warmseiten ab. Die relative Feuchte in den einzelnen Schichten liegt dabei überschlägig über der Sorptionsisotherme berechnet zwischen etwa 60 % r.F. auf der Warm- und 80 % auf der Kaltseite. Die effektive Umlagerung findet vor allem von der wärmsten zur kältesten Schicht statt. Die Wärmeleitfähigkeit zeigt aber nicht das ggf. erwartete Ergebnis wonach die feuchteste Schicht (an der Kaltseite) die höchste Wärmeleitfähigkeit aufweisen sollte, die trockenste Schicht an der Warmseite dagegen die geringste Wärmeleitfähigkeit. Stattdessen ist die Wärmeleitfähigkeit an der Warmseite am höchsten, nimmt zur Mitte dann ab und zur Kaltseite hin dann wieder zu. Wobei auch die äußerste und damit feuchteste Schicht nicht die höchste Wärmeleitfähigkeit aufweist.

Tabelle 9: Auswertung der einzelnen Schichten gem. ISO 10051 - Wärmeleitfähigkeit nach 250 h, Feuchtegehalt 11,8 M.-%

Schicht	Mitteltemp.	Trocken-Rohdichte		Wärmeleitfähigkeit umgerechnet auf 10 °C		Feuchtegehalt nach Messung	
	°C	kg/m ³		W/(m·K)		M.-%	
		linke Seite	rechte Seite	linke Seite	rechte Seite	linke Seite	rechte Seite
Kühlplatte							
1	5,9	118	117	0,0390	0,0397	13,8%	13,9%
2	7,9	103	100	0,0383	0,0371	11,7%	12,1%
3	9,9	92	93	0,0376	0,0379	11,2%	11,3%
4	11,9	110	108	0,0389	0,0390	10,2%	10,3%
5	13,9	118	112	0,0393	0,0398	9,2%	9,3%
Heizplatte							

Bei der zweiten Messung mit erhöhter Feuchte (im Mittel 80 % r.F. mit etwa 67 % auf der Warm- und 92 % auf der Kaltseite) wurde eine Einplatten-Messung an nur einer Probe durchgeführt, so dass der Wärmestrom nur von unten nach oben verläuft. Auch bei dieser Variante ergibt sich das gleiche Ergebnis: Die Wärmeleitfähigkeit scheint mit zunehmender Feuchte

nicht zu- sondern abzunehmen ist an der Warmseite am höchsten, nimmt zur Mitte hin ab und zur Kaltseite hin dann wieder zu.

Die nach Norm vorgesehene Auswertung der Einzelschichten zur Ermittlung des Einflusses der Feuchte auf die Wärmeleitfähigkeit erweist sich somit als nicht möglich, da sich ein physikalisch nicht plausibler Zusammenhang ergeben würde: Mit steigendem Feuchtegehalt sinkt die gemessene Wärmeleitfähigkeit. Die Ursache liegt vermutlich in dem in Abbildung 66 beschriebenen „Heat-Pipe-Effekt“. Feuchte verdampft in der warmen Schicht (entzieht Wärme) und kondensiert dann in den kälteren Bereichen. Bei der kältesten Schicht nimmt der Feuchtegehalt zwar zu, was zunächst zu einer höheren Wärmeleitfähigkeit führt. Der Effekt wird aber durch den Wärmegewinn aus der Kondensation überkompensiert. Die beiden Prozesse, Wärmeleitung und Feuchtetransport, lassen sich durch dieses Messverfahren nicht getrennt erfassen und sinnvoll bestimmen. In Abbildung 75 ist der Zusammenhang von Wärmeleitfähigkeit und Feuchtegehalt in den Einzelschichten dargestellt. Die dargestellten Werte sind bereits auf 10 °C umgerechnet, um die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit zu eliminieren. Zudem wird die Steigerung der Wärmeleitfähigkeit für jede einzelne Schicht bezogen auf den vorher ermittelten Trockenwert bestimmt. Auch bezogen auf den Trockenwert der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Schichten lässt sich kein proportionaler Zusammenhang von Feuchtegehalt und Wärmeleitfähigkeit erkennen.

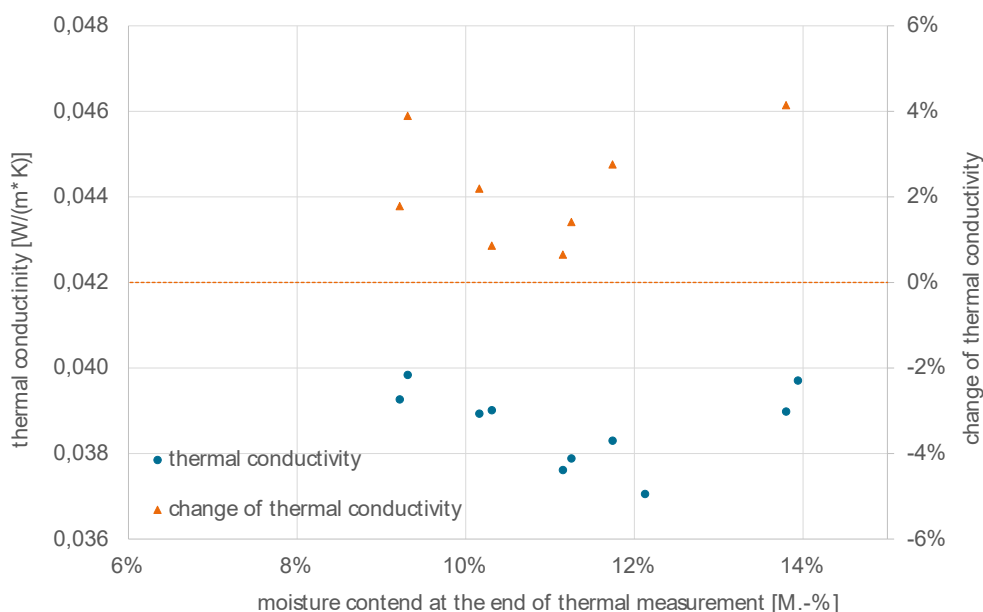


Abbildung 75: Gemessene und auf 10 °C umgerechnete feuchte Wärmeleitfähigkeit (blaue Punkte) für die einzelnen Schichten bezogen auf den Feuchtegehalt. Änderung der Wärmeleitfähigkeit (orangene Dreiecke) bezogen auf die vorher bestimmte trockene Wärmeleitfähigkeit.

4.3.4 Zusammenfassung Labormessung

Die Messung der feuchten Wärmeleitfähigkeit muss zum Erreichen des Beharrungszustands über einen sehr langen Zeitraum durchgeführt werden. Die Messdauer erhöht sich von üblicherweise maximal 24 h auf mehrere Tage bis Wochen. Zu Beginn der Messung ist die gemessene Wärmeleitfähigkeit deutlich erhöht. Am Ende sinkt der Wert aber bei dem hier geprüften Material und den anfänglichen mittleren Feuchten entsprechend der Lagerung bei 70 bzw. 80 % r.F. so weit ab, dass er weniger als 3 % bzw. $1 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ über dem Trockenwert liegt. Somit wäre ein Zuschlag nach DIN 4108-4 von 5 %, mindestens aber $2 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ auf den Nennwert (siehe Abschnitt 4.1) angemessen.

Wird die Messung zu früh abgebrochen, führt das zu einem zu hohen Wert für die Wärmeleitfähigkeit, da die noch andauernde Umverteilung von Feuchte diesen um die Latentwärmeeffekte erhöht.

Ein Auftrennen und separates Messen in mehreren Einzelschichten nach ISO 10051 liefert für die hier geprüften Dämmstoffproben keine sinnvollen Ergebnisse. Auch nach 12 Tagen findet im Beharrungszustand offensichtlich noch eine Feuchteumverteilung ohne Änderung der Feuchteprofile in der Probe statt und dieser sogenannte „Heat-Pipe-Effekt“ erschwert eine sinnvolle Auswertung.

Sowohl die Endergebnisse für die mittlere Wärmeleitfähigkeit über alle Einzelschichten als auch die Messung an einem Probekörper in Nenndicke (ohne Auftrennung) ergeben nahezu die gleichen Werte. Aufgrund des zwar angestrebten aber nicht tatsächlich erzielten Mehrwerts kann der Aufwand für das Aufteilen der Proben vermieden und direkt an der ganzen Platte gemessen werden. Da die Messungen vergleichsweise lange dauern und einen entsprechenden finanziellen Aufwand für die Labore bzw. Hersteller bedeuten, erscheint es lohnend, weiter an einer beschleunigten Methode zu forschen. Es bieten sich hierzu verschiedene Ansätze an. Zum einen könnte die Probendicke verkleinert werden - gemäß [46] kann das ein zielführender Ansatz sein. Die Proben würden dann nicht mehr in Nenndicke, sondern nur noch als dünne Schicht von 2 cm bis 3 cm gemessen werden. Zudem könnte mit einer optimierten Temperaturdifferenz die Messung schneller in Beharrung kommen. Allerdings muss dabei beachtet werden, dass kein Tauwasser in den Proben anfallen darf. Aus der Publikation geht nicht hervor, ob der Tauwasseranfall überprüft wurde. Zudem sollte beachtet werden, dass ein dünnerer Probekörper und eine geringere Temperaturdifferenz sich negativ auf die Messunsicherheit auswirken. Ein weiterer möglicher Ansatz wäre, eine Abklingfunktion für die Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Materialien zu entwickeln. So könnte man aus den Messdaten von 1 - 2 Tagen auf den Endwert nach mehreren Tagen schließen. Die Ansätze würden umfangreiche Laboruntersuchungen mit verschiedenen Materialtypen erfordern.

4.4 Nachberechnung der Laborversuche mit hygrothermischer Simulation und Bewertung

Die in Kapitel 4.3.3 beschriebenen Labormessungen des Probekörpers werden mit Hilfe des am Fraunhofer-IBP entwickelten und umfangreich validierten hygrothermischen Simulationsprogramms WUFI® [43] nachberechnet. Ziel dieser Nachberechnungen ist eine genauere Differenzierung zwischen der Erhöhung des Wärmetransports durch die feuchtebedingt erhöhte Wärmeleitfähigkeit und die bereits beschriebenen verbleibenden Latentwärmeeffekte. Dafür wird der Versuch mit Unterteilung der Dämmplatte in einzelne Schichten herangezogen, da hier über die Temperaturdifferenz an den Schichtgrenzen und die jeweiligen Wassergehalte der Schicht am ehesten eine rechnerische Differenzierung der verschiedenen Effekte realisierbar erscheint. Rein messtechnisch ist dies gar nicht möglich. Das liegt u.a. an der nur sehr begrenzten Erfassbarkeit der dafür erforderlichen Parameter. Mit vergleichsweise hoher Genauigkeit kann die Temperatur an verschiedenen Positionen erfasst werden – doch bereits hier stößt man an Grenzen, da die Sensoren und Kabel thermisch träge sind, Wärmebrückeneffekte aufweisen und im besten Fall auf ± 1 mm genau positioniert werden können. Doch auch diese geringe Abweichung kann bezogen auf die 2 cm dicken Teilschichten bei der Messung die Temperaturwerte bereits um mehrere Prozentpunkte verändern. Bei der relativen Feuchte liegt auch bei hochwertiger Sensorik und perfekter Positionierung die Messgenauigkeit selbst bei etwa ± 1 %. Im hohen Feuchtebereich über 95 % r.F. nimmt die Genauigkeit weiter ab. Die Wärmeströme an den einzelnen Schichtgrenzen der unterteilten Proben sind aufgrund der Größe der Sensorik nicht mehr sinnvoll erfassbar, und auch die Wassergehalte können nur durch wiegen der einzelnen Schichten im Anschluss an die Messung und mit der eher groben Auflösung von 2 cm bestimmt werden. Die Auswirkungen dieser Ungenauigkeiten bei der Messung könnten anhand der Simulationen analysiert, quantifiziert und bewertet werden.

4.4.1 Durchführung der Simulation

Die Randbedingungen für die Simulation werden analog zu den Bedingungen bei der Messung verwendet: Die Materialproben werden in fünf Schichten mit jeweils 20 mm Dicke unterteilt. Oberflächenbedingungen und Vorkonditionierung entsprechen den in Kapitel 4.3.2 beschriebenen Verhältnissen.

Die hygrothermischen Kennwerte für das betrachtete Holzfasermaterial wurden umfassend im hygrothermischen Labor des IBP gemessen. Neben den Sorptions- und Flüssigtransporteigenschaften für normale hygroskopische Baustoffe wurde auch der beginnende Flüssigtransport mit Hilfe des „Kapi-Test“ [47, 48] ermittelt. Dabei wird ein Probekörper im Temperaturgefälle exponiert, so dass sich über Dampfdiffusion der Feuchtegehalt auf der Kaltseite des Probekörpers anreichert, bis dort ab etwa 75 bis 80 % r.F. langsam Flüssigtransport zurück zur

Warmseite einsetzt und den weiteren Feuchteanstieg bremst. Bei diesem Testverfahren werden in der Klimakammer bei 23 °C und 65 % r.F. bereits vorkonditionierte Proben für bis zu zwei weiteren Monaten einer Temperaturdifferenz von 11 K ausgesetzt und die Feuchteverteilung innerhalb der Probekörper regelmäßig mittels NMR-Messung (mit einer Auflösung von 0,8 mm) erfasst. Die durch Saug- und Trocknungsversuch bereits ermittelten Flüssigtransportkoeffizienten werden dann für den niedrigen Kapillarwasserbereich so verfeinert, dass die gemessenen Feuchteprofile sowie ihr zeitlicher Verlauf in der Simulation gut abgebildet werden können. Dieses Messszenario repräsentiert den aktuellen Stand der Wissenschaft.

Zunächst erfolgt die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Schichten aus Dicke, Wärmestromdichte und Temperaturdifferenz. In Abbildung 76 sind Wärmeleitfähigkeit und Wassergehalt der einzelnen Schichten jeweils vergleichend aus Simulation und Messung dargestellt. Die aus der Simulation errechneten Wärmeleitfähigkeiten sind jeweils als grüner Punkt, die aus der Messung als oranger Punkt mit Fehlerbalken von $\pm 3\%$ angezeigt. Für Wärmeleitfähigkeit bei der Messung werden folgende Ausgangswerte verwendet: der Wärmestrom wird als konstant über die gesamte Probendicke und alle Schichten angenommen – hier liegt auch nur ein Messwert an der Kaltseite vor, da zwischen den Schichten kein Platz für zusätzliche Wärmestrommesser vorhanden ist. Die Temperaturdifferenzen basieren auf den Messwerten an den Schichtgrenzen. Alle Schichten werden mit 20 mm gleich dick angenommen. Resultierende Unterschiede bei den Wärmeleitfähigkeiten sind dementsprechend auf die unterschiedlichen Temperaturen und Feuchtegehalte in den einzelnen Schichten zurückzuführen. Die lineare Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit wird mit dem in der Laboruntersuchung ermittelten Koeffizient von 0,0001 W/mK pro 1 K (Kapitel 4.3.3.3) berücksichtigt und deren Feuchteabhängigkeit von den Messwerten an der trockenen und bei 80 % r.F. befeuchteten Materialprobe abgeleitet (Kapitel 4.3.3.4). Eine Unterscheidung zwischen der reinen feuchteabhängigen Wärmeleitung (sensibler Wärmestrom) und dem auch im eingeschwungenen Zustand noch auftretendem Latentwärmestrom (Heat-Pipe-Effekt) ist bei der Messung nicht möglich, weil nur der gesamte Wärmestrom messtechnisch erfasst werden kann.

4.4.2 Vergleich zwischen Simulation und Messung

Bei der Simulation werden drei Varianten dargestellt, bei denen für die Berechnung auf jeweils leicht unterschiedliche Ausgangswerte zurückgegriffen wird. Bei der linken Variante #1 (Abbildung 76) werden für die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Schichten sowohl die beidseitige Temperaturdifferenz als auch der hier zur Verfügung stehende lokale Wärmestrom (reine Leitung) explizit berücksichtigt. Die sich daraus ergebenden Wärmeleitfähigkeitswerte zeigen erwartungsgemäß eine leicht steigende Tendenz mit zunehmendem Wassergehalt. Die Übereinstimmigkeit mit den Messergebnissen ist allerdings hier sowohl bezüglich Niveau als auch Verlauf über die Probendicke nicht besonders zufriedenstellend. Dabei

ist noch zu beachten, dass auch in der Simulation der Latentwärmestrom an den Schichtgrenzen nicht einfach auswertbar ist, da der Dampf einfach ohne Phasenwechsel weiter in die nächste Schicht wandert.

Bei Variante #2 wird der Wärmestrom wie bei der Messung für alle Schichten gleich angenommen. Diese Variante entspricht am ehesten der Ermittlung aus der Messung, da hier ebenfalls der an der kalten Seite ankommende Wärmestrom einheitlich für alle Schichten, sowie die sich an den Schichtgrenzen ergebenden Temperaturen verwendet werden. Der an der Kaltseite ankommende Wärmestrom enthält sowohl in der Messung als auch bei der Simulation den Latentwärmeanteil, da an der dichten Oberfläche die Feuchte nicht entweichen kann. Die auf dieser Basis ermittelten Wärmeleitfähigkeiten aus der Simulation zeigen noch etwas deutlicher steigende Wärmeleitfähigkeitswerte mit zunehmendem Wassergehalt als Variante #1 mit lokal unterschiedlichem Wärmestrom. Leider ist aber auch die Übereinstimmung der Wärmeleitfähigkeit mit den Messwerten noch etwas schlechter als zuvor - insbesondere im mittleren Bereich des Materials, wo auf Basis der Messung niedrigere Werte auf Basis der Simulation dagegen höhere Werte als an der Kaltseite auftreten.

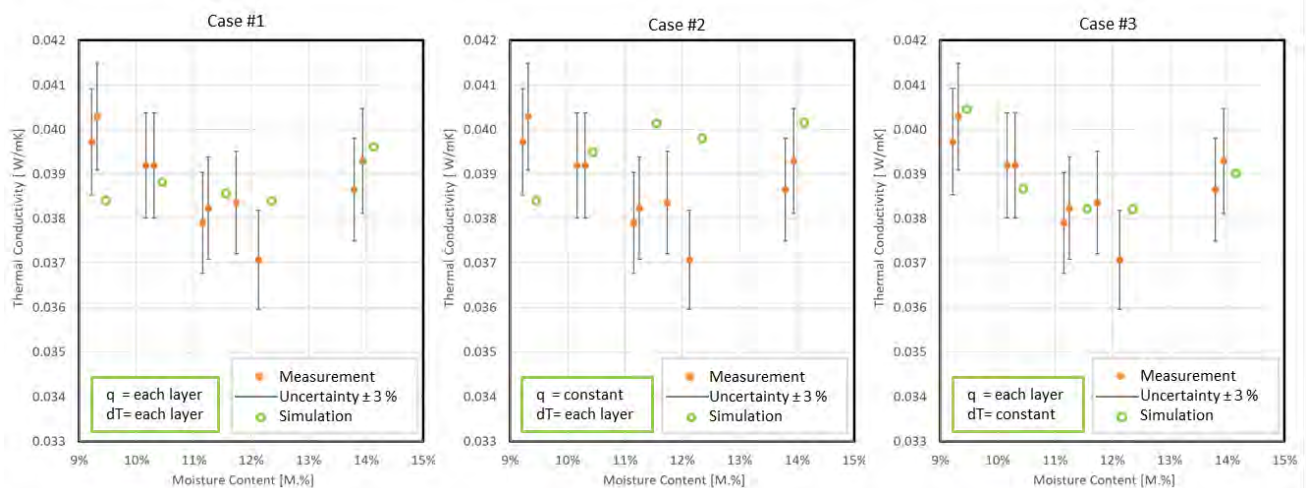


Abbildung 76: Wärmeleitfähigkeit ermittelt aus Messung (orange Punkte mit Fehlerindikator – bei allen drei Varianten gleich) und aus Simulation (grüne Punkte) wie folgt:
Links: Variante #1 mit lokalem Wärmestrom und lokaler Temperaturdifferenz
Mitte: Variante #2 mit konstantem Wärmestrom und lokaler Temperaturdifferenz
Rechts: Variante #3 mit lokalem Wärmestrom und konstanter Temperaturdifferenz von 2,0 K. Die Temperatur- und Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit sind wie im vorigen Kapitel beschrieben hinterlegt.

Bei Variante #3 dient der lokale Wärmestrom aus der Simulation zusammen mit einer konstanten Temperaturdifferenz von 2,0 K entsprechend der stationären Versuchsplanung als Berechnungsgrundlage. Diese Variante ist jedoch wenig plausibel, da die schichtweise leicht unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit auch zu variierenden Temperaturdifferenzen über die Schichten führt. Die auf diese Weise ermittelten Wärmeleitfähigkeitswerte zeigen bezüglich Niveaus und Verteilung eine bessere Übereinstimmung mit den Messergebnissen als die Varianten #1 und #2.

Trotz des bereits aufwändigen Vorgehens verbleiben für die gewünschte Differenzierung immer noch zu große Unsicherheiten. Die Dämmplatten werden in einzelne Schichten von 2 cm Dicke unterteilt. Bei sorgfältigem Vorgehen kann hier materialbedingt eine Genauigkeit von etwa ± 1 mm erreicht werden. Durch die gewählte Vorkonditionierung stellt sich im stationären Zustand ein Feuchteprofil ein, bei dem auf der Kaltseite etwa 95 - 97 % r.F. und auf der Warmseite etwa 60 - 70 % erreicht werden. Tauwasser entsteht bei diesen Bedingungen nicht. Der effektive Wärmestrom wird daher gegen Ende des Versuchs im-stationären Zustand als überall gleich angenommen – was aber trotzdem nicht ganz korrekt ist, da sich neben der reinen Wärmeleitung auch ein Latentwärmestrom einstellt. Dieser transportiert auch im eingeschwungenen Zustand weiter Dampf von der Warm- zur Kaltseite und in der anderen Richtung die sich auf der Kaltseite anreichernde Feuchte über Flüssigtransport zurück zur Warmseite – ohne dass sich die Feuchteprofile noch ändern. Der Wassergehalt, der im Anschluss an die Messung durch Wiegen der einzelnen Schichten ermittelt wird, liegt in den einzelnen Schichten zwischen 9,3 M.-% an der warmen und 13,9 M.-% an der kalten Seite. Die mit WUFI® simulierten Werte liegen dabei meist etwas höher als die gemessenen Werte. An den Rändern der Proben liegt der Unterschied bei etwa 0,1 bis 0,2 M.%, im mittleren Bereich dagegen bis zu ca. 0,4 M.-%. Diese Differenzen können auf etwas abweichende Materialeigenschaften sowie auf die, über die Dicke leicht inhomogenen Eigenschaften (Rohdichte, Diffusionswiderstand), zurückzuführen sein. Sowohl die Simulation als auch für die Nachberechnung aus den Laborversuchen wird beides vereinfacht homogen angenommen. Die Wärmeströme an den einzelnen Schichtgrenzen sind nicht mit vertretbarem Aufwand messbar, fehlen also als Vergleichsgröße zur Simulation. Auch eine weitere Differenzierung bezüglich des Feuchtegehalts durch noch dünnere Schichten ist nicht mehr praktikabel.

Somit zeigen die Nachberechnungen der Versuche, dass eine Übereinstimmung einer detaillierten und lokalen Abbildung der Wärmeströme zwischen Simulation und Messung nur schwer möglich ist und sehr genaue Eingangsparameter erfordern würde. Auf messtechnischer Seite machen sich Messunsicherheiten, fehlende lokale Wärmeströme, verbleibende Variation bei der Dicken und Inhomogenität der Prüfkörper bemerkbar, auf der Simulationsseite vermutlich die homogene Beschreibung der Materialeigenschaften eines nicht homogenen Materials (Naturfaser mit Hydrophobierung und Bindemittel und Luftraum) wodurch Feuchtetransport und -sorption nicht in der für die spezifische Fragestellung erforderlichen Exaktheit abgebildet werden. Die bei der Messung beschriebenen Probleme lassen sich zum Teil gar nicht, zum Teil nur mit hohem Aufwand lösen. Letzteres gilt auch für die Simulation: zwar wären detaillierte Materialparameter bis hin zu einer zweidimensionalen Betrachtung denkbar, der zusätzliche Aufwand wäre aber ebenfalls erheblich und für jedes einzelne zu untersuchende Material erneut erforderlich.

4.4.3 Erkenntnisse aus den Nachberechnungen der Laborversuche

Die Vergleiche zwischen Nachberechnung und Laborversuch zeigen, dass bei einer detaillierten und lokalen Differenzierung des Gesamtwärmestroms in sensible feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit und Latentwärmestrom eine sehr hohe Genauigkeit der Eingangsparameter erforderlich ist und bereits kleine Unterschiede zu deutlich anderen Verteilungen der Wärmeleitfähigkeit über die einzelnen Schichten führen.

Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass der unter Kapitel 4.3 entwickelte und gewählte Versuchsaufbau gut geeignet ist, um die effektive Wärmeleitfähigkeit über die gesamte Schicht zu ermitteln. Auch die Nachsimulation ist mit diesem effektiven Wert (inkl. der verbleibenden Latentwärmeeffekte) für die gesamte Schichtdicke mit guter Genauigkeit möglich – auch wenn die Verteilung zwischen sensiblem und latentem Wärmestrom in den einzelnen Unterschichten offensichtlich nicht ganz korrekt wiedergegeben wird.

Bei der Nachberechnung der Wärmeleitfähigkeitsmessung eines Holzfaserdämmstoffs ist jedoch noch zu beachten, dass diese Dämmstoffe ausgeprägt inhomogene Materialien sind. Sie bestehen aus den Holzfasern, den Lufthohlräumen dazwischen und ggf. zusätzlich aus einer „Ummantelung“ der Fasern durch Binde- und Hydrophobierungsmittel. Während Feuchte über Diffusion vergleichsweise schnell durch die Materialien hindurchtransportiert werden kann, dauert es unter Umständen deutlich länger, bis die bereits im Luftraum neben der Faser angekommenen Wassermoleküle beispielsweise durch die Paraffinschicht hindurch wandern und von der Holzfaser selbst absorbiert werden. Der für das Material ermittelte μ -Wert beschreibt den geringen Widerstand durch das Material bis hin zur ummantelten Faseroberfläche, jedoch nicht den größeren Widerstand durch die Ummantelung in die Faser hinein, so dass die Dauer von durch Absorption determinierten Be- und Entfeuchtungsprozessen in der Simulation u.U. zeitlich nicht exakt abgebildet werden kann. Dies stellt bei normaler Bewitterung meist ein eher vernachlässigbares Problem dar, weil Feuchteaufnahme und -abgabe ständig wechseln. Bei einem Laborversuch mit permanent konstanten Randbedingungen kann sich dieser Unterschied jedoch deutlicher bemerkbar machen. Niveau und Verteilung der Feuchte innerhalb der Probekörper werden daher bei der Nachberechnung der Laborversuche stärker gewichtet als der zeitliche Verlauf.

4.5 Überprüfung des Messverfahrens

Bereits in Kapitel 4.3.1 wurde festgestellt, dass durch die Wahl der Randbedingungen im Labor bereits ein Großteil der Latentwärmeeffekte ausgeschlossen werden kann und der aufgrund des „Heat-Pipe-Effekts“ verbleibende Anteil mit 0,5 % so gering ausfällt, dass dieser Anteil deutlich unter der Messgenauigkeit (standardmäßig ca. 3 %) bleibt. Auf dieser Basis wurde bereits entschieden, den Laborversuch mit dampfdichter Separierung der einzelnen Schichten aufgrund des geringen Aufwand-Nutzen-Verhältnisses für die eventuelle Reduzierung auf 0,25 % Anteil nicht durchzuführen. Auch bei dem in mehreren Stufen durchgeführten und

dabei verfeinerten Versuch mit geschichtetem Probekörper ohne Folie und anschließender detaillierter Nachsimulation in Kapitel 4.4 ist festzustellen, dass eine Differenzierung zwischen der feuchtebedingten Erhöhung des sensiblen und latenten Wärmestroms nicht zuverlässig möglich, aber aufgrund der geringen Größenordnung auch nicht erforderlich ist. Der ebenfalls in Kapitel 4.3.2 beschriebene Versuch mit der ganzen Dämmplatte ohne Unterteilung in Schichten erfordert zwar ebenfalls eine entsprechende Dauer bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustands, der Aufwand für Vorbereitung und Auswertung ist aber deutlich geringer. Die nur geringen zusätzlichen Erkenntnisse des geschichteten Versuchsaufbaus rechtfertigen den Mehraufwand dagegen nicht.

Aus diesen Gründen wird der einschichtige Versuch als Basis für die Ermittlung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Naturfaserdämmungen als am geeignetsten angesehen.

4.5.1 Überprüfung anhand verschiedener Naturfaserdämmstoffe

Um zu überprüfen, ob der Latentwärmeanteil auch bei anderen Naturfaserdämmstoffen vernachlässigbar klein bleibt, werden weitere Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen ebenfalls rechnerisch untersucht. Dabei kann teilweise auf Untersuchungen aus einem früheren Forschungsprojekt [34] zurückgegriffen werden, bei dem die Wärmeleitfähigkeit sowohl im trockenen Zustand als auch nach Konditionierung bei 80 % r.F. gemessen wurde. Auch hier liegen jedem Material die erforderlichen hygrothermischen Materialparameter für die Simulation in gemessener Form vor. Die Temperatur- und Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit wird allgemein wie in Kapitel 4.3.3.3 und Kapitel 4.5.2 beschrieben berücksichtigt. Die Nachberechnung erfolgt unter Anpassung der Randbedingungen von Temperatur und Dicke der Proben entsprechend den durchgeführten Messungen wiederum einmal mit und einmal ohne Berücksichtigung der Latentwärme. Die sich daraus ergebene Wärmeleitfähigkeit ist im Vergleich zu den Messwerten in Tabelle 10 aufgelistet. Ebenfalls enthalten sind die Messwerte aus dem aktuellen Projekt.

Tabelle 10: Aus Messung und Simulation ermittelte Wärmeleitfähigkeiten vier verschiedener Naturfaserdämmstoffe mit unterschiedlicher Rohdichte. Nach den Wärmeleitfähigkeitswerten aus der jeweiligen Simulation ist in Klammern die Differenz zum Wert aus der Messung angegeben.

condition		thermal conductivity [W/m·K]			
		material			
		wood fibre board 96 [kg/m ³]	wood fibre board 115 [kg/m ³]	wood fibre board 172 [kg/m ³]	hemp fibre board 148 [kg/m ³]
measurement		0,0387	0,0392	0,0444	0,0429
simulation	with latent heat	0,0389 (+ 0,0002)	0,0394 (+ 0,0002)	0,0449 (+ 0,0005)	0,0431 (+ 0,0002)
	without latent heat	0,0387 (+ 0)	0,0394 (+ 0,0002)	0,0445 (+ 0,0001)	0,0430 (+ 0,0001)
	increasing by latent heat	0,0002	0	0,0004	0,0001

Auch bei dieser Berechnung wurde die finale Abbildung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit verwendet, wodurch sich bei der Simulation aus Sicherheitsgründen leicht erhöhte Werte gegenüber der Messung ergeben. Die Auswertung zeigt, dass bei Simulation mit und ohne Latentwärme sich im Mittel aller vier Materialien eine Differenz von nur 0,000175 W/mK ergibt. Bei der Platte mit Rohdichte von 172 kg/m³ wird der Maximalwert von 0,0004 W/mK erreicht, bei der Platte mit Rohdichte 115 kg/m³ ist gar keine Differenz durch Berechnung mit Latentwärme feststellbar.

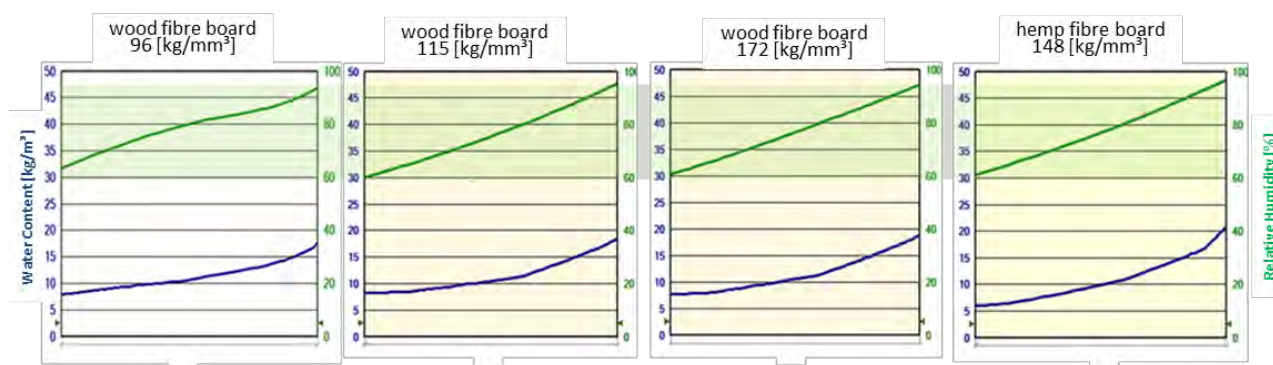


Abbildung 77: Simulierte Feuchteverteilung in den vier verschiedenen Naturfasermaterialien nach Erreichen des eingeschwungenen Zustands bei den Randbedingungen der Labormessung (warme Seite links). Die grüne Kurve stellt das Profil der relativen Feuchte, die blaue das des Wassergehalts dar. Der grüne Bereich markiert die relative Feuchte von 60 bis 95 %.

Die Feuchteverteilung in den Materialien nach Erreichen des eingeschwungenen Zustands ist in Abbildung 77 dargestellt. Die Bandbreite der relativen Feuchte über dem Probenquerschnitt liegt bei allen vier Naturfasermaterialien zwischen etwa 60 % r.F. auf der Warmseite und gut 95 % r.F. auf der Kaltseite (jeweils rechts im Bild). Die gewählten Versuchsbedingungen führen somit auch hier in keinem Fall zu Kondensation auf der Kaltseite, wodurch der Großteil der Latentwärmeeffekte eliminiert wird.

Bei den vier untersuchten Materialien liegt die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit durch verbleibende Latentwärmeeinflüsse zwischen 0 % bei der Holzfaserdämmplatte mit Rohdichte 115 kg/m³ und knapp 1 % bei der Holzfaserdämmplatte mit 172 kg/m³. Hier liegt ein Zusammenhang mit der Rohdichte der Materialien nahe: Je mehr Holzfasermasse vorhanden ist, desto mehr gespeicherte Feuchte ist verfügbar und desto mehr Flüssigtransport kann in diesen Fasern stattfinden – dementsprechend vergrößert sich der durch den „Heat-Pipe-Effekt“ bedingte Latentwärmeanteil, bleibt aber auch hier mit knapp 1 % Erhöhung auf einem sehr geringen Niveau unterhalb dessen der Messgenauigkeit.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das gewählte Versuchsszenario mit Vorkonditionierung bei 80 % r.F. und geringer Temperaturdifferenz von etwa 1 K pro 1 cm Materialdicke gewährleistet, dass auch auf der Kaltseite die relative Feuchte klar unter 100 % bleibt und somit keine Kondensationsbedingungen auftreten. Der Latentwärmeanteil, der durch Feuchteumverteilung bei stabilem Feuchtprofil durch den „Heat-Pipe-Effekt“ nicht eliminiert werden kann, bleibt vernachlässigbar gering. Die Untersuchungen in Kapitel 4.3.3.5 haben darüber hinaus gezeigt, dass die Auswertung der einzelnen Schichten trotz erheblichen Mehraufwands kein eindeutiges Ergebnis bezüglich der Differenzierung zwischen feuchtebedingtem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit in den einzelnen, unterschiedlichen feuchten Schichten und Latentwärmeanteil ermöglicht. Dies, und die direkten Messergebnisse belegen aber auch, dass im durch die Messungen erfassten Bereich bis 95 % r.F., nur ein geringer Anstieg dieser Wärmeleitfähigkeit erfolgt. Dieser kann vereinfacht linear abgebildet werden und so die überwiegenden in der Praxis auftretenden Feuchtebedingungen in den Materialien abdecken.

Das vorgestellte Messverfahren umfasst, wie zuvor erläutert, im nicht unterteilten Probekörper einen Feuchtebereich von etwa 60 % r.F. auf der warmen und bis 95 % auf der kalten Seite. Der Mittelwert entspricht dabei dem Wassergehalt bei 80 % r.F. für den der Probekörper vorkonditioniert wurde und der sich im Lauf des Versuchs aufgrund des dampfdichten Einbaus nicht verändert. Implizit enthält die Messung des Anstiegs der Wärmeleitfähigkeit des Materials gegenüber dem Trockenwert hier also den o.g. Feuchtebereich von 60 bis 95%. Es wäre also auch ein evtl. überproportionaler Anstieg der Wärmeleitfähigkeit im höheren Feuchtebereich bis 95 % bereits gemittelt enthalten. Da beim Versuch mit dem geschichteten Probekörper ohne Trennfolie aus den Messungen kein belastbarer Unterschied – weder direkt über zusätzliche hygrothermische Simulationen – noch für die einzelnen Schichten ableitbar war, kann davon ausgegangen werden, dass die Unterschiede der Wärmeleitfähigkeit zwischen 60 und

95 % nicht signifikant ausfallen. Eine lineare Extrapolation der Wärmeleitfähigkeit vom Trockenwert über den oben ermittelten Wert bei 80 % r.F. bis zum Wert bei 95 % r.F. erscheint daher gut vertretbar.

Aus früheren Untersuchungen [49, 50] ist bekannt, dass die Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen mit hoher Porosität im hohen Feuchtebereich (bis zur freien Sättigung des Materials bei in der Regel über 900 kg/m^3), nicht weiter linear sondern eher exponentiell ansteigt und sich einem Endwert von etwa $0,6 \text{ W/mK}$ annähert, was der Wärmeleitfähigkeit von flüssigem, unbewegtem Wasser entspricht. Dies ist plausibel, da der Dämmstoff in diesem Zustand im Wesentlichen aus Wasser besteht. Daher wird die Beschreibung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Naturfaserdämmstoffen für hygrothermische Berechnungen wie folgt vorgeschlagen: Bis 95 % r.F. wird die Wärmeleitfähigkeit linear ansteigend angenommen, wobei die Steigung aus dem Trockenwert und dem Messwert, der bei 80 % r.F. vorkonditionierten Probe ermittelt wird. Ab 95 % steigt die Wärmeleitfähigkeit exponentiell bis auf $0,6 \text{ W/mK}$ bei maximaler Sättigung. Da bei Dämmstoffen eine sehr hohe Porosität von etwa 90 bis 95 % vorliegt, ergibt sich auch die maximale Sättigung von etwa 900 bis 950 kg/m^3 , wenn der verfügbare Porenraum vollständig mit Wasser gefüllt ist.

Dieser Ansatz wird im Folgenden nochmals durch die Nachberechnung der Wärmeleitfähigkeitsmessungen anhand von den vier Naturfaserdämmstoffen validiert. Dabei wird der vorgeschlagene Ansatz einer Kombination aus linearem bis 95 % r.F. und anschließend exponentiellem Verlauf mit zwei weiteren möglichen Ansätzen verglichen, bei denen nur der lineare (gängig, aber im hohen Feuchtebereich falsch) bzw. nur ein exponentieller Verlauf (im niedrigen Feuchtebereich schwer ermittelbar, daher meist als Standardfunktion basierend auf dem Trockenwert verwendet) herangezogen wird. In Tabelle 11 sind die ermittelten Wärmeleitfähigkeiten aus Messung und Simulation für die drei Varianten zusammengestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei Simulation mit durchgängig exponentieller Steigung (gem. Trockenwert und Standardkurve) die berechneten Wärmeleitfähigkeiten bis zu $0,014 \text{ W/mK}$ (3,1 %) niedriger liegen als die Messwerte. Bei Simulation mit linearer Steigung der Wärmeleitfähigkeit gemäß der aktuellen Messung bleibt die Abweichung deutlich geringer. Hier liegt der simulierte Wert maximal $0,0004 \text{ W/mK}$ (0,8 %) niedriger als bei der Messung – dies ergibt sich aus der zu niedrigen Wärmeleitfähigkeit bei höheren Feuchtegehalten. Bei der vorgeschlagenen kombinierten Beschreibung der Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit ist die Abweichung nur minimal größer als beim linearen Ansatz, liegt nun aber $0,0005 \text{ W/mK}$ (1,1 %) leicht über dem Messwert und damit auf der sicheren Seite. Da der Aufwand für eine weitere und bessere Differenzierung der Zunahme mit dem Wassergehalt, wie bereits mehrfach beschrieben, erheblich wäre, scheint der um 1,1 % ganz leicht auf der sicheren Seite liegende Ansatz gut vertretbar.

Tabelle 11: Wärmeleitfähigkeit aus Messung und Nachberechnung der Labormessung mit Hilfe hygrothermischer Simulation bei Verwendung von drei Varianten zur Abbildung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit über den ganzen Feuchtebereich (linear, exponentiell, kombiniert). Die Werte in Klammern sind die absoluten Abweichungen vom jeweiligen Messergebnis.

condition		thermal conductivity [W/m·K]			
		material			
		wood fibre board 96 [kg/m ³]	wood fibre board 115 [kg/m ³]	wood fibre board 172 [kg/m ³]	hemp fibre board 148 [kg/m ³]
measurement		0,0387	0,0392	0,0444	0,0429
simulation with different ap- proaches for the moisture-de- pendent thermal conductivity	linear increase	0,0388 (+ 0,0001)	0,0392 (± 0,000)	0,0440 (- 0,0004)	0,0427 (- 0,0002)
	exponential in- crease	0,0383 (- 0,0004)	0,0380 (- 0,0012)	0,0430 (- 0,0014)	0,0417 (- 0,0012)
	up to 95 % RH linear then exp.	0,0388 (+ 0,0001)	0,0394 (+ 0,0002)	0,0449 (+ 0,0005)	0,0431 (+ 0,0002)

4.5.2 Charakterisierung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit im hygrothermischen Materialdatensatz

In Abbildung 78 ist exemplarisch die Beschreibung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit einer Holzfaserdämmplatte gemäß dem vorgeschlagenen Ansatz in der WUFI®-Datenbank dargestellt. In der Tabelle links sind in der ersten Spalte die jeweiligen Wassergehalte und in der zweiten die zugehörige Wärmeleitfähigkeit beim jeweiligen Wassergehalt aufgelistet. Startwert ganz oben ist der Trockenwert, dann folgt der auf Basis der Messung ermittelte Wert bei 80 % r.F. Daraus kann der Steigungskoeffizient der Wärmeleitfähigkeit pro 1 kg/m³ Zunahme des Wassergehalts in [(W/mK)/(kg/m³)] und daraus wiederum der Wert bei 95 % r.F. ermittelt werden. Die Wärmeleitfähigkeitswerte oberhalb 95 % r.F. werden bis zum maximalen Wassergehalt (1000 kg/m³ x Porosität [-]) mit der Standard-Exponentialkurve die beim Wert von Wasser bei 0,6 W/mK endet, ergänzt. In der Regel ist noch eine Anpassung für den Übergang der beiden Kurvenbereiche erforderlich. Dazu kann der Wert bei 50 kg/m³ als Startpunkt der Standardkurve zwischen dem Wert bei 95 % r.F. (im Beispiel 19,55 kg/m³) und dem Wert bei 100 kg/m³. linear interpoliert werden.

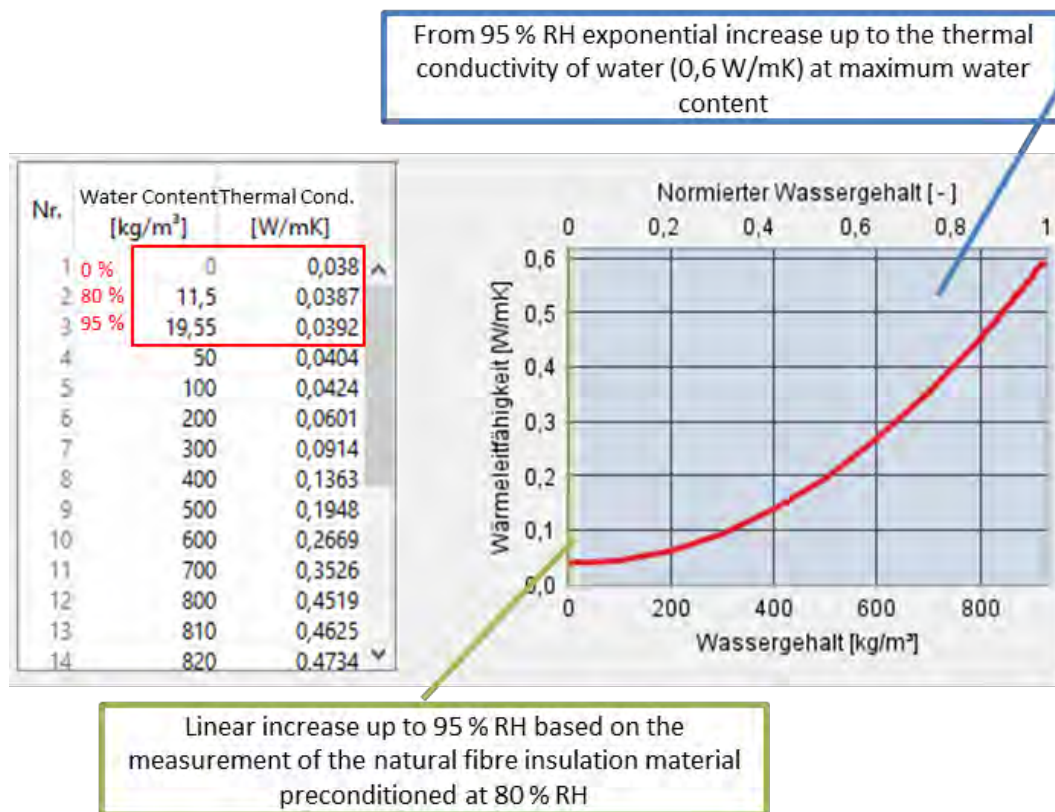


Abbildung 78: Beschreibung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit in WUFI®. Links ist die tabellarische Eingabe und rechts ist deren graphische Darstellung abgebildet.

4.5.3 Zusammenfassung Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit

In diesem Kapitel wurde die feuchtebedingte Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von Naturfaserdämmstoffen anhand von Simulationen untersucht.

Zunächst wurde die im Rahmen dieses Projekts durchgeführte Labormessung einer Holzfaserdämmplatte, die aus fünf dünnen Platten zusammengesetzt war, nachberechnet. Die ursprüngliche Idee, durch die Nachberechnung der Messung die durch den Wassergehalt bedingte Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit mit ihrer lokalen Verteilung zu ermitteln, war nicht mit der erhofften Genauigkeit möglich. Dies liegt zum einen an den für diese Zielstellung zu großen Messunsicherheiten und der Inhomogenität des Materials (die dadurch bedingten Abweichungen können größer ausfallen als die zu identifizierenden Zielgrößen), und zum anderen an der nicht genau genug abbildbaren Feuchtverteilung in der Simulation, insbesondere im Zustand des „Heat-Pipe-Effekts“, die eine nochmals deutlich aufwändigere Ermittlung der feuchtetechnischen Kennwerte erfordern würde.

Durch die Nachberechnung der Wärmeleitfähigkeitsmessung der gesamten Platte konnten im Vergleich zur geschichteten und feuchtetechnisch abgetrennten Platte folgende Erkenntnisse erzielt werden: Die Simulation mit und ohne Latentwärme ergab, dass deren Einfluss auf die

Wärmeleitfähigkeitsmessung vernachlässigbar gering bleibt, wenn die Messung nach EN 12677 ohne Tauwasserbildung an der Kaltseite und unter Einhaltung des Abbruchkriteriums durchgeführt wird. Die Beschreibung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit kann bis 95 % r.F. direkt aus dem vorgeschlagenen Laborversuch abgeleitet werden. Der restliche Verlauf bis zur maximalen Sättigung wird dann vereinfacht über einen exponentiellen Anstieg bis auf die Wärmeleitfähigkeit von Wasser von 0,6 W/mK berücksichtigt. Die Validierung dieses Ansatzes anhand von vier verschiedenen Naturfaserdämmstoffen zeigt, dass auf diese Weise eine, nur leicht auf der sicheren Seite liegende Simulation des Versuchs möglich ist.

4.6 Abgleich des Labordatensatzes mit Freilandaufzeichnungen

Die Ergebnisse aus Kapitel 4.2 haben gezeigt, dass die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit auf höherem Luftfeuchteniveau sorptiver Dämmstoffe in der praktischen Anwendung weniger durch den Feuchtegehalt des Materials selbst, sondern vor allem durch Latentwärmeeffekte hervorgerufen wird. Im Laborverfahren konnte die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit eines Holzweichfaserdämmstoffs (Nennichte: 110 kg/m³) mit vernachlässigbar geringem Einfluss der Latentwärmeeffekte (0,0002 W/mK) bestimmt werden. Bei den Varianten W 1.1 und W 1.2 kam genau dieses Holzweichfaserprodukt im WDVS zur Anwendung.

In Abbildung 79 und Abbildung 80 ist der Simulationsabgleich dieser Varianten unter Anwendung des im Labor ermittelten Dämmstoffdatensatzes inkl. feuchteabhängiger Wärmeleitfähigkeit aufgetragen. Das Feuchteniveau im WDVS lag in beiden Fällen im Betrachtungszeitraum zwischen < 60 % und 100 % r.F, sodass ein durchaus großer Feuchtebereich inkl. des Bereichs > 95% r.F. abgedeckt wird.

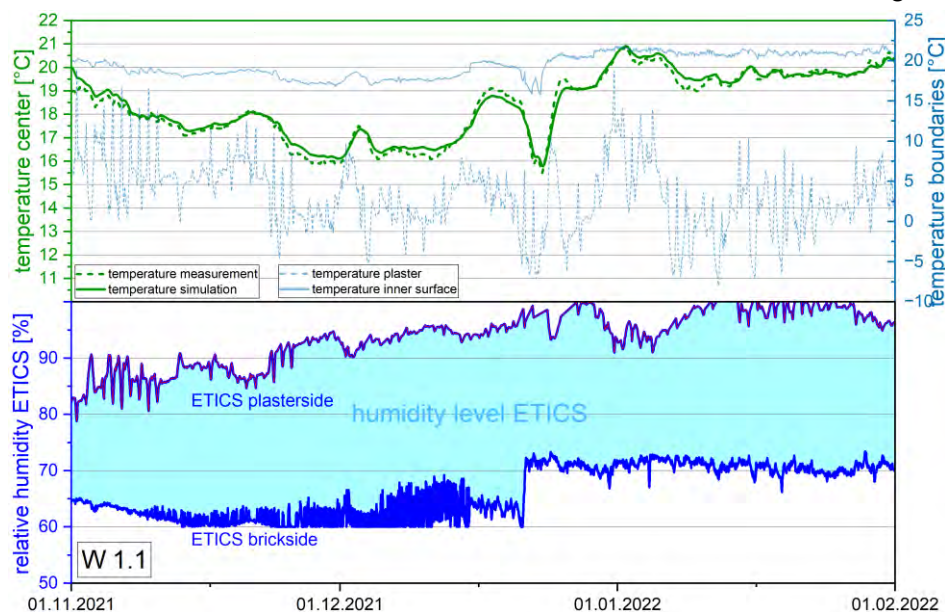


Abbildung 79: Abgleich der gemessenen und simulierten Temperaturen an der Messstelle „m“ für den Aufbau W 1.1 mit 250 mm Mauerwerk und 220 mm WF-WDVS (oben). Feuchteniveau im WDVS im Betrachtungszeitraum (unten).

Es zeigt sich in beiden Fällen eine hinreichend genaue Prognose des Temperaturverlaufs aus der Simulation. Daraus lässt sich schließen, dass das im Labor angewendete Verfahren zur Bestimmung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit sorptiver Dämmstoffe geeignet ist. Latentwärmeeffekte werden in der Messung auf ein vernachlässigbar geringes Niveau reduziert, sodass die Ergebnisse aus der Wärmeleitfähigkeitsmessung direkt in der Simulation herangezogen werden können, ohne dass eine doppelte Berücksichtigung der Latentwärmeeffekte zu erwarten ist.

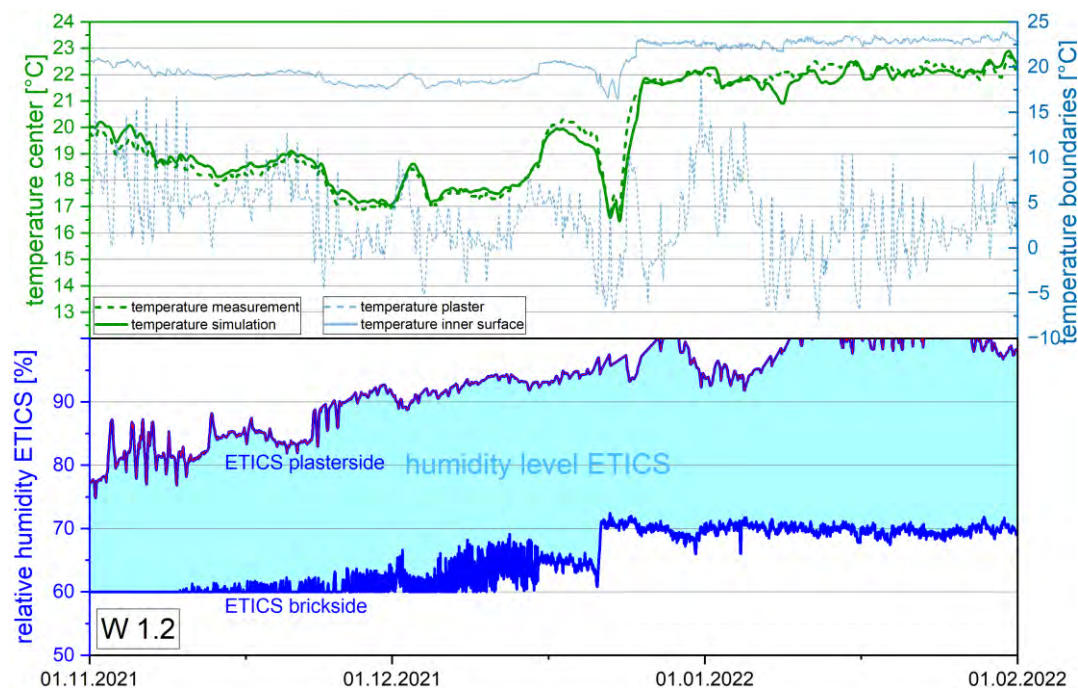


Abbildung 80: Abgleich der gemessenen und simulierten Temperaturen an der Messstelle „m“ für den Aufbau W 1.2 mit 150 mm Mauerwerk und 220 mm WF-WDVS (oben). Feuchteniveau im WDVS im Betrachtungszeitraum (unten).

4.7 Schlussfolgerungen und Ausblick

4.7.1 In-situ Wärmestrommessung und Nachsimulation

Die in-situ Messungen und deren Nachsimulation lassen in Kombination mit den Laborversuchen den Schluss zu, dass bei den im Einbauzustand überwiegend auftretenden Feuchtegehalten bis etwa 95 % r.F. der feuchtegehaltsbedingte Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von sorptionsfähigen Dämmstoffen inklusive der in diesem Bereich auftretenden Latentwärmestransporte (sog. „Heat-Pipe-Effekt“) bei gleichbleibenden Feuchteprofilen eher gering bleibt.

Bei Feuchten oberhalb von 95 % r.F. nimmt der Wärmestransport dann stärker zu. Dies liegt zum einen daran, dass bei höheren relativen Feuchten die Sorptionsfeuchtegehalte und damit auch die Wärmeleitfähigkeit stärker ansteigen und zum anderen an den ebenfalls in größerem

Umfang auftretenden Latentwärmeströmen. Dies gilt insbesondere bei Auftreten von Tauwasser, was aber zumindest bei Naturfaserdämmstoffen schon aus Dauerhaftigkeitsgründen möglichst vermieden werden sollte.

Die Varianten mit nicht-sorptionsfähigen Dämmstoffen zeigten bei ansonsten vergleichbaren Randbedingungen allgemein weniger aber im Vergleich zu den aufgrund der Bemessungswerte erwartbaren Werten ebenfalls noch erhöhte Wärmeströme. Die Nachsimulation der Messungen dieser Varianten lässt darauf schließen, dass die feuchtebedingte Erhöhung der sensiblen und latenten Wärmeströme im meist auftretenden Feuchtebereich bis 95 % r.F. geringer ausfällt als bei den sorptionsfähigen Dämmstoffen. Es ist davon auszugehen, dass der Einfluss bei noch höheren Feuchten oder Auftreten von Tauwasser nicht mehr wesentlich geringer bleibt als bei anderen Dämmstoffen. Da jedoch kein Mineralfaser-WDVS untersucht wurde, kann nur der erste Aspekt direkt aus den Messwerten abgeleitet werden. Ein Unterschied ergibt sich bei den sorptionsfähigen Materialien noch daraus, dass diese im Sommer bei höheren Luftfeuchten Feuchte „einlagern“, die dann im Herbst und Winter wieder nach außen umverteilt bzw. abgegeben wird.

Zusammenfassend lässt sich erschließen, dass ein Zuschlag von 5 % auf den Nennwert für Holzfaserdämmstoffe nach DIN 4108-4 im Jahresmittel vermutlich nicht zu streng angesetzt ist. Die vorliegenden Ergebnisse deuten sogar darauf hin, dass für die rein thermische Bemessung (z.B. Energieausweisberechnung) zumindest in den ersten Jahren sogar eher ein etwas höherer Zuschlag zwischen 5 und 8 % gerechtfertigt sein könnte. Dies wäre ggf. anhand einer breiteren Materialbasis weiter zu prüfen. Anlass für eine Reduktion des 5-%-Zuschlags liefern die Versuchsergebnisse jedoch nicht. Ein pauschaler Feuchtezuschlag auf pflanzliche Faserdämmstoffe von 20 %, wie er in der ÖNORM B 6015-2 ohne Überwachung bei der Produktion angesetzt wird, erscheint dagegen mit zu viel Sicherheit versehen zu sein. Hier wäre eine Reduktion auf den Bereich zwischen 10 und 15 % realistischer.

4.7.2 Weitere Ergebnisse aus der Auswertung der Freilandversuche

Unabhängig von der feuchtebedingten Veränderung zeigte sich, dass eine erhöhte Einblasdichte außerhalb des Zulassungsbereichs bei Zelluloseeinblasdämmstoffen zu überproportional erhöhten Wärmeströmen führen kann, weswegen ein vorschriftsgemäßer Einbau von besonderer Bedeutung ist.

Die Stroheinblasdämmung zeigte deutlich geringere Wärmeströme, als die technischen Produktdaten es in diesem Fall erwarten ließen. Der vom Hersteller zur Verfügung gestellte Nennwert (λ_D) für dieses Einblasstrohprodukt ist demnach mit 0,055 W/mK offenbar sehr hoch angesetzt.

4.7.3 Laborverfahren zur Bestimmung der feuchteabhängigen WLF im Labor und Bewertung durch hygrothermische Simulation

Die simulationsbasierte Vorstudie hat gezeigt, dass bei geeigneter Vorkonditionierung der sorptiven Dämmstoffprobekörper in Verbindung mit einem geeigneten Temperaturgradienten Kondensationsvorgänge während der Messung vermieden werden können.

Die verbleibenden Latentwärmeeffekte reduzieren sich im konkreten Fall auf maximal 0,5 % vom Messwert der Wärmeleitfähigkeit und liegen somit unterhalb der Messgenauigkeitsgrenze der Wärmeleitfähigkeitsmessung (standardmäßig 2 % - 3 %). Das zunächst angestrebte Verfahren mit foliengetrennten Einzelschichten ist als ungeeignet einzustufen, da sich trotz des unverhältnismäßig höheren Aufwands für die Probenvorbereitung nur eine vernachlässigbar geringfügige Reduktion des Latentwärmeeinflusses während der Messung erzielen lässt, die den Zusatzaufwand nicht rechtfertigt.

Aus der Labormessung am Plattengerät kann geschlossen werden, dass das effizienteste Verfahren zur Messung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit, das Verfahren am nicht aufgetrennten Probekörper nach DIN EN 12664 bzw. ISO 10051 ist. Es liefert in den Untersuchungen den gleichen Gesamtwert der Wärmeleitfähigkeit, wie die Messung am aufgetrennten Probekörper. Da eine detaillierte Analyse der Wärme- und Feuchteströme innerhalb des Materials infolge der begrenzten Genauigkeit der Messdaten und Materialparameter teilweise zu physikalisch unsinnigen Zusammenhängen führt, bietet dieses Verfahren keinen relevanten Mehrwert. Dieser könnte nur durch eine erhebliche und vermutlich unwirtschaftliche Steigerung des Messaufwands erreicht werden.

Aus diesen Gründen wird das Verfahren nach DIN EN 12664 bzw. ISO 10051 am ganzen Probekörper als am besten geeignet zur Ermittlung der feuchtebedingten Wärmeleitfähigkeit eingestuft. Die hier zu erwartenden Restunsicherheiten sind als vernachlässigbar gering einzustufen, da in der Realität allein die materialbedingten Streuungen der Wärmeleitfähigkeit eine größere Schwankungsbreite haben.

Die Nachberechnung der Laboruntersuchungen hat gezeigt, dass eine simulationsbasierte Differenzierung zwischen der feuchtebedingten Erhöhung des sensiblen und latenten Wärmestroms im Bereich bis 95 % r.F. nicht zuverlässig möglich, aber aufgrund der geringen Größenordnung während der Labormessung auch nicht erforderlich ist. Die Effekte im höheren Feuchtebereich werden dagegen wohl gut erfasst, wie die meist recht gute Übereinstimmung der Versuchsnachberechnungen mit den Messdaten nahelegt.

Die simulationsbasierte Überprüfung von Laborversuchen an Holzfaserplatten unterschiedlicher Dichte sowie einer Hanffaserplatte belegt, dass die Latentwärmeeffekte im Laborversuch jeweils maximal 1% höher liegen als ohne Berücksichtigung der Latentwärme. Außerdem wird festgestellt, dass das gewählte Versuchsszenario mit 80 % r.F. und einer Temperaturdifferenz von etwa 1 K pro 1 cm Materialdicke gewährleistet, dass die r.F. auf der Kaltseite sicher unterhalb von 100 % bleibt und somit keine Kondensationsbedingungen auftreten.

Das festgelegte Messverfahren umfasst im nicht unterteilten Probekörper einen Feuchtebereich von etwa 60 % r.F. auf der warmen, und bis 95 % r.F. auf der kalten Seite. Da es während der Messung zu keinem überproportional hohen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit kommt, kann vereinfacht ein linearer Zusammenhang zwischen Porenluftfeuchte und feuchteabhängiger Wärmeleitfähigkeit bis 95 % angenommen werden. Zur Beschreibung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit des gemessenen Probekörpers wird festgelegt, dass der Messwert der Wärmeleitfähigkeit auf die mittlere Porenluftfeuchte während der Messung bezogen wird (80 % r.F. im vorliegenden Fall). Zwischen dem Wert der trockenen Wärmeleitfähigkeit und dem Wert bei 80 % Porenluftfeuchte wird linear interpoliert und aufgrund des anzunehmenden linearen Zusammenhangs bis 95 % Porenluftfeuchte vereinfacht weiter linear extrapoliert. Im Bereich darüber wird ein exponentieller Anstieg bis 100 % r.F. auf 0,6 W/mK (Wärmeleitfähigkeit von Wasser) angenommen.

Die Anwendung des ermittelten Datensatzes zur Nachsimulation des Freilandversuchs hat gezeigt, dass durch das Laborverfahren und der daraus ermittelten Wärmeleitfähigkeit das reale feuchteabhängige Verhalten der Wärmeleitfähigkeit in der hygrothermischen Simulation hinreichend genau abgebildet wird.

4.7.4 Ausblick

Der Einfluss von Latentwärmetransportvorgängen auf die Wärmeschutzperformance eines Bauteils mit sorptionsfähigen Dämmstoffen unter instationären Randbedingungen geht aus den gegenständlichen Freilanduntersuchungen als durchaus relevant hervor. Diese lassen sich zwar mit einer hygrothermischen Simulation gut nachvollziehen, die rein thermischen Rechenwerte für die Wärmeleitfähigkeiten liefern jedoch bei den hier untersuchten Materialien ein etwas zu optimistisches Bild. In Folgeuntersuchungen sollte dieser Einfluss anhand von weiteren Parametervariationen (Diffusionseigenschaften außen/innen, Feuchtelast im Innenraum, Bauteil Dach/Wand, Dichtevierungen bei gleichem Material...) und zur genaueren Quantifizierung zusätzlich in geeigneten Laborversuchen überprüft werden.

Aufgrund der in der Praxis tendenziell außen besonders guten Feuchteabfuhr bei Aufbauten mit Vorhangfassade (hinterlüftete Fassade) ist gerade bei diesen ein geringeres Feuchteniveau im Gefach und somit ein entsprechend geringerer Einfluss der Latentwärme zu erwarten. Darauf deuten auch die durchgeführten in-situ Messungen [37] an den hinterlüfteten Varianten hin. Auf Basis derartiger Untersuchungen sollten geeignete und bestenfalls produkt- und dichtespezifische Vorgaben für den Feuchtezuschlag bei rein thermischen Bemessungen (z.B. Energieausweis) möglich sein.

Der Einfluss der Einblasdichte bei Zelluloseeinblasdämmungen ist genauer zu charakterisieren. In einer diesbezüglichen Literaturrecherche konnten keine genaueren Angaben dazu ermittelt werden.

Die genauen hygrothermischen Eigenschaften von strohbasierten Dämmmaterialien inkl. Einblasstrohdämmungen sind zu bestimmen, um eine simulationsbasierte Beschreibung der hygrothermischen Vorgänge im Realfall zu ermöglichen. Im Allgemeinen sollte das Potential der hier untersuchten Stroheinblasdämmung durch genauere hygrothermische Untersuchungen weiter ausgeschöpft werden. Das vorgeschlagene Laborverfahren für die Ermittlung der thermischen Eigenschaften für die hygrothermische Simulation sollte an unterschiedlichen sorptionsfähigen Dämmstoffen zur Bestimmung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit angewendet werden, um dieses auf eventuell verbliebene Schwachstellen und seine Allgemeintauglichkeit zu prüfen sowie bei Bedarf Anpassungen vorzunehmen.

5 Literatur

- [1] *Teibinger, M.; Bachinger, J.; Matzinger, I.*: Winddichtheit von Unterdächern. Holzfor- schung Austria, Wien Ausgabe 2014.
- [2] *Kehrer, M.; Künzel, H.M.; Sedlbauer, K.*: Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen - ist der Feuchtezuschlag für die Wärmeleitfähigkeit gerechtfertigt? – IBP-Mitteilung. Fraunhofer IBP, 2001, https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/doku- mente/ibpmitteilungen/1-400/301-400/390_IBPmitteilung.pdf [Zugriff am: 11.05.2020].
- [3] ÖNORM B 8110-2: Wärmeschutz im Hochbau - Teil 2: Wasserdampfdiffusion, -konvek- tion und Kondensationsschutz. Ausgabe Januar 2020.
- [4] *Kehl, D.; Plagge, R.; Grunewald, J.*: Wann geht Holz kaputt? - Nachweistechische Beurteilung von Holz zerstörenden Pilzen. In: BuFAS e.V. (Hrsg.): 23. Hanseatische Sanierungstage – Feuchte - Wärme - Schimmelpilz. Fraunhofer IRB Verlag; Beuth, Heringsdorf, Usedom, 2012, S. 61-74.
- [5] *Viitanen, H.*: Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures – Effect of humidity, temperature and exposure time. Uppsala, Swedish Univ. of Agricultural Science Dept. of Forest Products, Dissertation, 1996.
- [6] *Viitanen, H.; Toratti, T.; Makkonen, L. et al.*: Towards modelling of decay risk of wooden materials. In: Holz als Roh- und Werkstoff 68 (2010), Heft 3, S. 303-313.
- [7] WTA 6-8: Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation. WTA-MERKBLATT, Ausgabe 2016.
- [8] *Zirkelbach, D.; Schöner, T.; Tanaka, E. et al.*: Consistent European Guidelines for Internal Insulation of Building Stock and Heritage Einheitlicher europäischer Leitfaden für die Innendämmung von Bestandsbauten und Baudenkmälern – Einheitlicher europäischer Leitfaden für die Innendämmung von Bestandsbauten und Baudenkmälern. Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen/Dresden/Limelette Ausgabe Juli 2022.

- [9] ÖNORM B 6015-2: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät - Teil2: Ermittlung des Nennwertes und des Bemessungswertes der Wärmeleitfähigkeit für homogene Baustoffe. Ausgabe 2009.
- [10] DIN 4108-4: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte. Ausgabe November 2020.
- [11] *Kehrer, M.; Künzel, H.M.; Sedlbauer, K.*: Bestimmung feuchtetechnischer Kennwerte an Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen. Fraunhofer IBP Ausgabe 2001.
- [12] DIN 68800-2: Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Ausgabe Februar 2012.
- [13] Ongoing research project - *Zirkelbach, D; Schöner, T.; Tanaka, E. et al.*: Energieoptimiertes Bauen: NaVe - Nachweisverfahren für Schadensmechanismen bei der hygrothermischen Simulation Ausgabe PTJ 2022 (FKZ: 03ET1649B).
- [14] ÖNORM B 3802-2: Holzschutz im Bauwesen - Teil 2: Baulicher Schutz des Holzes. Ausgabe Januar 2015.
- [15] *Zirkelbach, D.; Tanaka, E. (Hrsg.)*: Evaluation of decay resistance of wood fibre insulation based on hygrothermal simulation and comparative laboratory tests, 2021.
- [16] METEONORM – Global Meteorological Database, <http://www.meteororm.com> [Zugriff am: 31.01.2020].
- [17] *Viitanen, H.; Toratti, T.; Makkonen, L.*: Towards modelling of decay risk of wooden materials. *In: Holz als Roh- und Werkstoff*, S. 303-313.
- [18] *Brischke, C.; Soetbeer, A.; Meyer-Veltrup, L.*: The minimum moisture threshold for wood decay by basidiomycetes revisited. A review and modified pile experiments with Norway spruce and European beech decayed by *Coniophora puteana* and *Trametes versicolor*. *In: Holzforschung* 71 (2017), Heft 11, S. 893-903.
- [19] DIN 113-1: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Prüfverfahren in Bezug auf Holz zerstörende Basidiomyceten - Teil 1: Bewertung der bioziden Wirksamkeit von Holzschutzmitteln. DIN EN, Ausgabe Februar 2021.
- [20] *Greenspan, L.*: Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *In: Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A: Physics and Chemistry* 81A (1977), Heft 1, S. 89.
- [21] *Suzuki, K.*: Moisture Content Levels and Decay of Hemlock Ausgabe 1986.
- [22] *Suzuki, K.*: Effect of Cyclic Change of Temperature on Fungal Growth and Mass Loss. The International Research Group on Wood Preservation Ausgabe 1994.
- [23] *Fukuda, K.; Okayasu, Y.; Haraguchi, T.*: Influence of Temperature on the Growth and Wood-decomposing Ability of Wood-rotting Fungi. *In: Bulletin of the Experiment Forests* (1981), Heft 17, S. 49-55.
- [24] *Maeda, H.*: Analysis and Modelling of the Change of the Density and Strength distribution during the Wood Rot Processing. Tokyo, Tokyo University, 2013.
- [25] *Saito, H.; Fukuda, K.; Sawachi, T.*: Integration model of hygrothermal analysis with decay process for durability assessment of building envelopes. *In: Building Simulation* 5 (2012), Heft 4, S. 315-324.

- [26] IBK, IBP & BTU: Energetisches Bewertungsverfahren für Bestandsgebäude mit Holzbalkendecken. IBK, IBP & BTU Ausgabe 2016.
- [27] *Sedlbauer, K.*: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Stuttgart, Universität Stuttgart, 2001.
- [28] *Viitanen, H.*: Untersuchungen und dynamische Simulationen zum Schimmelpilzwachstum in Holzbauquerschnitten – Simulation and modelling critical conditions for fungi to develop in wood, Holzbauphysik Kongress, München, 2010.
- [29] BuFAS e.V. (*Hrsg.*): Wann geht Holz kaputt? - Nachweistechische Beurteilung von Holz zerstörenden Pilzen, 23. Hanseatische Sanierungstage - Feuchte - Wärme - Schimmelpilz, Fraunhofer IRB Verlag; Beuth, Heringsdorf, Usedom, 2012.
- [30] *Zirkelbach, D.; Ruisinger, U.*; et.al: Consistent European Guidelines for Internal Insulation of Building Stock and Heritage Ausgabe 2022.
- [31] *Hukka, A.; Viitanen, H.*: A mathematical model of mould growth on wooden material. *In: Wood Science and Technology* 33 (1999), Heft 6, S. 475-485.
- [32] *Viitanen, H.*: Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures – Effect of humidity, temperature and exposure time. Uppsala, Swedish Univ. of Agricultural Science, Dissertation, 1996.
- [33] SN EN ISO 10456 ; SIA 279.041:2007: Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte (ISO 10456:2007). Ausgabe 2018.
- [34] Fraunhofer Institut für Bauphysik; Forschungsinsitut für Wärmeschutz e.V. (FIW): Energieeffizienzsteigerung durch Innendämmsysteme - Anwendungsbereiche – Chancen und Grenzen. Fraunhofer Institut für Bauphysik; Forschungsinsitut für Wärmeschutz e.V. (FIW) Ausgabe 2019.
- [35] Fraunhofer IBP: Energieeffizienzsteigerung durch Innendämmsysteme : Anwendungsbereiche, Chancen und Grenzen : Forschung für energieeffiziente Gebäude und Quartiere. FIW, IBP, München, Holzkirchen.
- [36] ongoing diploma thesis Hinteregger, D.: working title: Hygrothermische in situ Messungen an Dämmmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen, TU Graz, diploma thesis, 2023.
- [37] *Tieben, J.; Nusser, B.; Zirkelbach, D.*: Nachhaltig gedämmt – Ist der normative Feuchtezuschlag für Gefachdämmungen aus Schafwolle und Strohfasern gerechtfertigt? *In: Holzbau - die neue quadriga*, Heft Heft 3. Kastner, Wolnzach (D), 2022, S. 21-25.
- [38] DIN EN ISO 10456:2010-05: Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte.
- [39] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Untersuchungen zur Optimierung und Standardisierung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen – Gemeinsamer Abschlussbericht zum Verbundvorhaben. Fraunhofer Institut für

- Bauphysik; Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH; Institut für Betriebstechnik und Bauforschung *et al.* Ausgabe Januar 2008.
- [40] *Engelund Thybring, E.; Fredriksson, M.; Zelinka, S.L. et al.*: Water in Wood – A Review of Current Understanding and Knowledge Gaps. *In: Forests* 13 (2022), Heft 12, S. 2051.
- [41] *Chen, M.; Coasne, B.; Guyer, R. et al.*: Role of hydrogen bonding in hysteresis observed in sorption-induced swelling of soft nanoporous polymers. *In: Nature communications*, Vol. 9 (2018), Iss. 1, p. 3507.
- [42] *Lopez Hurtado, P.; Rouilly, A.; Vandebossche, V. et al.*: A review on the properties of cellulose fibre insulation. *In: Building and Environment* 96 (2016), S. 170-177.
- [43] *Künzel, H.M.*: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Stuttgart Ausgabe 1994.
- [44] DIN EN 12664:2001-05, Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten_ - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät_ - Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN_12664:2001. Ausgabe 2001.
- [45] 10051: Determination of thermal transmissivity of a moist material. ISO, Ausgabe 1996.
- [46] *EL Assaad, M.; Colinart, T.; Lecompte, T.*: Thermal conductivity assessment of moist building insulation material using a Heat Flow Meter apparatus. *In: Building and Environment* 234 (2023), Heft 3, S. 110184.
- [47] *Binder, A.*: Entwicklung eines Testverfahrens zur Quantifizierung des kapillaren Rücktransports kapillaraktiver Innendämmstoffe Ausgabe 2010.
- [48] *Binder, A.; Zirkelbach, D.; Künzel, H.*: Test method to quantify the wicking properties of insulation materials designed to prevent interstitial condensation, Buildings IX: thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings Atlanta, 2010.
- [49] *Commerer, W.F.*: Der Feuchteinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Wärmedämmstoffen, Band 6; S. 259-266 Ausgabe 1987.
- [50] *Commerer, J.*: Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen. Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V., München Ausgabe 1984.

Anhang

Entwicklung von Auswertungsmethode und Prognosemodellen bzgl. des Holzfäulerisikos

Stufe	Methoden, Grenzwerte, Normen	Vorteile, Nachteile, Merkmale
1	<p>20 M.-% (Massivholz) bzw. 18 M.-% (Holzwerkstoff) darf langfristig nicht überschritten werden.</p> <p>Überschreitung bei Massivholz für 6 Monate (3 Monate – AT) bzw. für Holzwerkstoffe für 3 Monate bis 22 bzw. 20 % zulässig.</p> <p>Geregelt in DIN 68800-3 („Holzschutz-Norm“) bzw. ÖNORM B 3802-2.</p>	<p>Einfache Beurteilung.</p> <p>Abgrenzung zwischen Fäule und Tragfähigkeit nicht immer ganz eindeutig.</p> <p>Grenzwerte für nicht tragende Holzwerkstoffe sowie Faserdämmstoffen nicht maßgeblich – aber auch keine anderen bekannt.</p> <p>Der für biologischen Holzabbau ebenfalls maßgebliche Effekt der Temperatur wird nicht berücksichtigt.</p> <p>In den Grenzwerten ist bezüglich der Fäulnisproblematik ein sehr hoher Sicherheitspuffer enthalten. Die Beurteilung liegt daher sehr weit auf der sicheren Seite.</p>
2	<p>Grenzwertkurve der relativen Feuchte abhängig von der Temperatur (s. Abbildung 31) darf im 24-Stunden-Mittel nicht überschritten werden.</p> <p>Geregelt in WTA 6-5</p>	<p>Der Grenzwert von 20 M.-% (entspricht ca. 86 % r.F.) für Massivholz (Stufe 1) gilt nur noch bei 30 °C.</p> <p>Bei niedrigeren Temperaturen sind höhere Feuchteverhältnisse zulässig bis max. 95 % r.F (entspricht ca. 26 M.-%.) bei 0 °C.</p> <p>Das Niveau der Grenzfeuchte ist immer noch mit deutlichen Sicherheiten belegt und dementsprechend deutlich niedriger als die Ergebnisse der Laboruntersuchungen aus diesem Projekt sowie aus der Literatur.</p> <p>Bei kurzfristigen Überschreitungen kein Nachweis möglich. Zeitlicher Aspekt (instationäre Bewertung)</p>

		<p>fehlt: Wie lange müssen die Bedingungen auftreten bevor der Pilz wachsen und Holz abbauen kann?</p> <p>Genauer, aber immer noch weit auf der sicheren Seite.</p>
3	<p>Prognose des Masseverlusts mit Hilfe des bio-hygrothermischen Modells.</p> <p>Die Grenzkurve der holzerstörenden Pilze sind für Massivholz und Holzfasermaterialien (abhängig von Affinität im Vergleich von Holz) festgelegt.</p> <p>Ergebnis von aktuellem ThermNat-Projekt.</p>	<p>Die Verzögerung bis zum Anfang der Holzabbauprozesse kann berücksichtigt werden. Die bisherige Grenzkurve von WTA (Stufe 2) für Massivholz mit deutlich großen Sicherheitspuffer ist so weit modifiziert, damit die von Laboruntersuchungen nachgewiesenen Masseverluste rechnerisch reproduzierbar sind. Diese Grenzkurve wird provisorisch „ThermNat II“ genannt.</p> <p>Die Holzfasermaterialien, die höhere Beständigkeit als Referenzholz ausweisen, können mit dieser Grenzkurve deren Holzfäulerisiko auswerten. Für die Holzfasermaterialien, die weniger beständig als Massivholz sind, wird weiterhin die WTA Grenzkurve zur Auswertung verwendet. Diese Kurve wird in diesem Projekt mit „ThermNat I“ bezeichnet.</p> <p>Allerdings zeigte ein untersuchtes Holzfasermaterial höhere Beständigkeit als Massivholz bei 97 % und niedrigere bei 100 % r.F. Für solche Materialien kann „ThermNat I“ bei unter 100 % r.F. einen unrealistisch hohen Masseverlust prognostizieren.</p>
4 (Ausblick)	Prognosemodelle mit materialspezifischer Grenzkurve	<p>Materialspezifische Grenzkurven erhöhen die Genauigkeit der Prognose und können die individuellen Eigenschaften des Materials optimal berücksichtigen. Daher soll für diesen Fall eine Methode entwickelt werden, wie aus möglichst einfachen Laboruntersuchungen eine individuelle Grenzkurve ermittelt werden kann.</p>
5 (Ausblick)	Weiterentwicklung zu instationären Prognosemodellen	<p>Um die Dauerhaftigkeit von Holzmaterialien in der Konstruktion realistisch zu beurteilen, sollten die Verläufe der Temperatur und relativen Feuchte im Material berücksichtigt werden. In den instationären Prognosemodellen sollte der zeitlichen Effekt - inklusive kurz- oder langfristiger Unterbrechungen</p>

		der optimalen Bedingungen für Holzabbauprozesse - ausführlicher erfasst werden.
6 (Aus- blick)	Veröffentlichung ei- nes praxistauglichen Auswertungstools	Die Prognosemodelle zeigen den instationären Verlauf des Masseverlusts. Die Plausibilität der Auswertung mittels der Progno- semodelle soll anhand von Validierungen unter rea- len Bedingungen überprüft werden. Zur Erleichterung und Harmonisierung der Interpre- tation der Ergebnisse, wird ein Ampelschema erar- beitet (z.B. grün , wenn die Grenzkurve nicht über- schritten wird – gelb , wenn die Grenzkurve über- schritten wird, dabei aber kein bzw. nur marginaler Masseverlust prognostiziert wird – rot , wenn signifi- kanter Masseverlust prognostiziert wird.)